



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH
Institut für Kernphysik

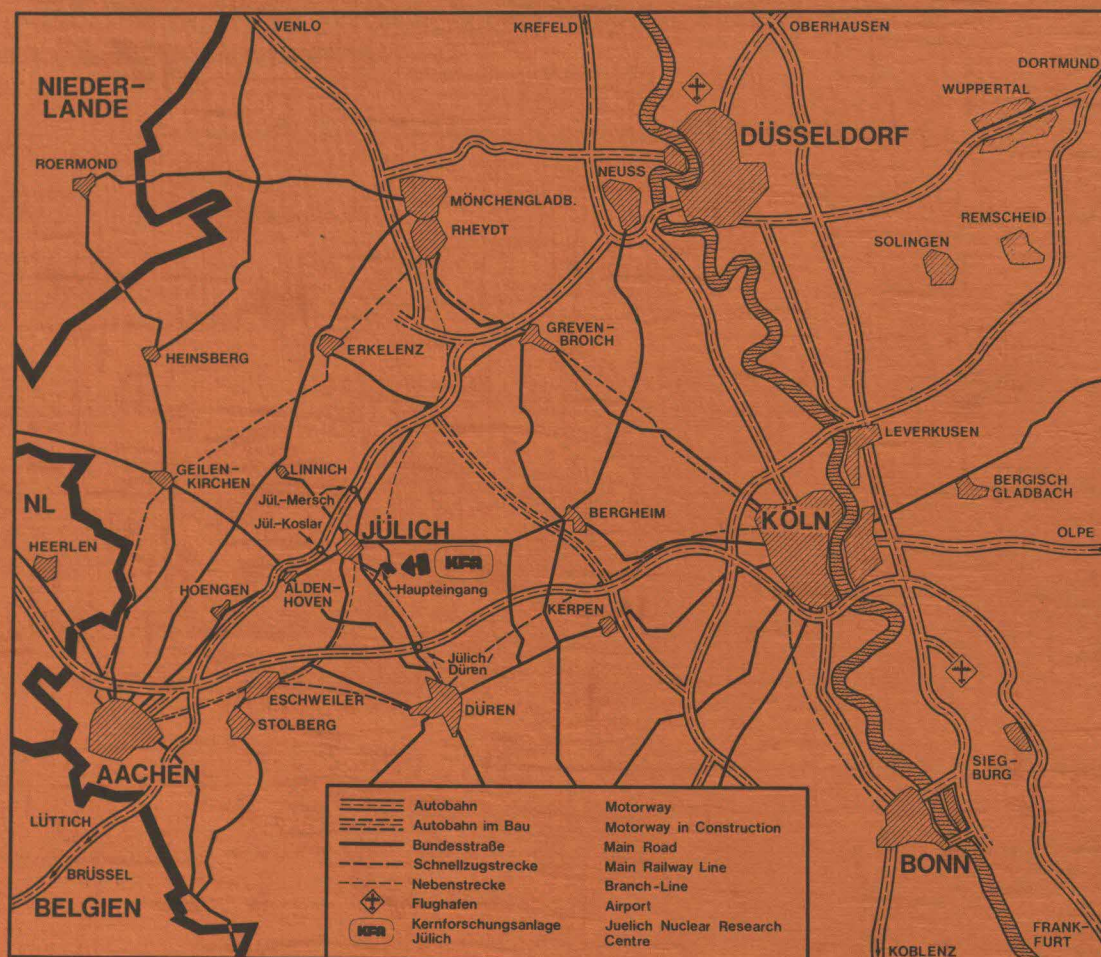
**Verfahren zur Bestimmung der effektiven
Wärmekapazität thermischer Flachkollektoren**

von

R. Schröer, J. Ungeheuer

Jül - Spez - 93
Dezember 1980

ISSN 0343 - 7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 93
 Institut für Kernphysik Jül - Spez - 93

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: (024 61) 610 · Telex: 8335 56 kfa d

Verfahren zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität thermischer Flachkollektoren

von

R. Schröer, J. Ungeheuer

Abstract

In the presented study different methods for heat capacity determination of thermic flat plate collectors are described and experimentally investigated. The tests were performed on two commercial collectors produced by BBC/Süddeutsche Metallwerke Walldorf and by SA Giordano/France. The collector from France was checked within a joint test programme of the European community.

It could be shown that well reproducible results could be obtained by using the latter in detail described experimental technique called integration method.

Experimental results and theoretical calculations were in good agreement for the investigated collectors.

The comparison of the two different calculation methods (BSE and analytical method) shows that the BSE method despite a minimum of effort yields good results with a for practical application sufficient high accuracy.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Wärmekapazität von thermischen Flachkollektoren beschrieben und experimentell untersucht.

Die Messungen wurden an zwei industriell gefertigten Kollektoren der Firma BBC/Süddeutsche Metallwerke Walldorf und SA Giordano/Frankreich durchgeführt. Der französische Kollektor stand im Rahmen eines Testprogramms der Kommission der Europäischen Gemeinschaft zur Verfügung.

Es hat sich gezeigt, daß mit einem in der Arbeit näher beschriebenen experimentellen Verfahren (Integrationsmethode) gut reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können.

Experimentelle und rechnerische Verfahren ergaben an den untersuchten Kollektoren gute Übereinstimmung.

Der Vergleich der rechnerischen Verfahren (BSE- und analytische Methode) zeigt, daß die BSE-Methode mit sehr geringem Arbeitsaufwand gute Ergebnisse liefert, die für die in der Praxis notwendige Genauigkeit hinreichend sind.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Beschreibung eines thermischen Flachkollektors	2
3. Bedeutung der Wärmekapazität	4
3.1 Physikalische Grundlagen	4
3.2 Wärmekapazität als Kollektorgröße	7
3.3 Auswirkungen der Wärmekapazität auf den Systemwirkungsgrad	8
4. Testmethoden zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität	10
5. Methoden zur rechnerischen Bestimmung der Wärmekapazität	11
5.1 Testverfahren des Bundesverbandes Solarenergie (BSE)	11
5.1.1 Allgemeines zur BSE-Methode	11
5.1.2 Theoretische Grundlagen	11
5.1.3 Durchführung des Verfahrens	12
5.2 Analytische Methode	13
5.2.1 Allgemeines zum Verfahren	13
5.2.2 Theoretische Grundlagen	13
5.2.3 Durchführung des Verfahrens	15
6. Methoden zur experimentellen Bestimmung der effektiven Wärmekapazität	19
6.1 Integrationsmethode	19
6.1.1 Allgemeines zum Verfahren	19
6.1.2 Theoretische Grundlagen	19
6.1.3 Experimentelle Durchführung	21
6.2 Verfahren der American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)	23
6.2.1 Allgemeines zum Verfahren	23
6.2.2 Theoretische Grundlagen	23
6.2.3 Experimentelle Durchführung	26
7. Beschreibung der Meßapparatur und der Labor- bedingungen	28

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
8. Beschreibung der verwendeten Kollektoren	33
9. Auswertung der Meßergebnisse	35
9.1 CEC-3 Kollektor	35
9.1.1 BSE Methode	35
9.1.2 Analytische Methode	35
9.1.3 Integrationsmethode	36
9.1.4 ASHRAE-Verfahren	38
9.2 BBC-Kollektor	39
9.2.1 BSE-Methode	39
9.2.2 Analytische Methode	39
9.2.3 Integrationsmethode	40
10. Abschätzung der Meßfehler	42
11. Diskussion der Ergebnisse	44
12. Auswertungsbeispiele	46
13. Nomenklatur	52
14. Literaturverzeichnis	54

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der Nutzung der Sonnenenergie gilt heute, in Anbetracht der allgemeinen Energiesituation, verstärktes Interesse. Eine Möglichkeit - im Bereich der Sonnenenergie - ist die Verwendung des thermischen Flachkollektors, der zur Erzeugung von Wärmeenergie, vorwiegend im Temperaturbereich unter 100°C , eingesetzt wird.

Die verschiedenen Kollektortypen unterscheiden sich durch technische und physikalische Eigenschaften.

Die technischen Merkmale, wie z.B. zulässiger Druck, Korrosionsbeständigkeit, verwendete Materialien, Kollektorgröße usw., sind leicht zu bestimmen und werden meist vom Hersteller angegeben.

Der Wirkungsgrad, die Wärmeverlustkoeffizienten, das Absorptionsvermögen und die Wärmekapazität des Kollektors sind physikalische Größen und lassen sich durch experimentelle Untersuchungen und Berechnungen ermitteln.

Um die Gebrauchstauglichkeit der verschiedenen Kollektortypen und Ausführungsformen hinsichtlich ihres physikalischen Verhaltens vergleichen zu können, sind Vorschriften für allgemeingültige Testmethoden erforderlich.

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Methoden zur Bestimmung der Wärmekapazität untersucht.

Zunächst wird die Wirkungsweise eines Flachkollektors dargestellt und anschließend auf die Bedeutung der Wärmekapazität eingegangen. Verschiedene Prüfverfahren werden vorgestellt und experimentelle Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Kollektortypen durchgeführt.

Anhand der Testergebnisse werden die Verfahren diskutiert und miteinander verglichen.

2. Beschreibung eines thermischen Flachkollektors

Ein thermischer Flachkollektor, wie in Abb. 1 und 2 dargestellt, ist im wesentlichen aus einem Absorber, einer transparenten Abdeckung, Isolationsmaterialien und einem Gehäuse zusammengesetzt.

Der Absorber besteht im allgemeinen aus Metall oder temperaturbeständigem Kunststoff und ist schwarz beschichtet.

Er hat die Aufgabe, einen möglichst großen Anteil der einfallenden Solarstrahlung in Wärme umzuwandeln und an das Wärmeträgermedium abzugeben.

Die Abdeckung, aus Glas oder transparentem Kunststoff, soll möglichst durchlässig für Sonnenlicht und undurchlässig für die vom Absorber ausgehende Wärmestrahlung sein.

Die Wärmeverluste der Rückseite und der Seitenteile werden durch Polyurethan- und Polystyrolschäume oder Mineralwolle, als Isolationsmaterial, weitgehend verhindert.

In dem Gehäuse, aus Metall oder Kunststoff, sind die Kollektorkomponenten untergebracht /3/.

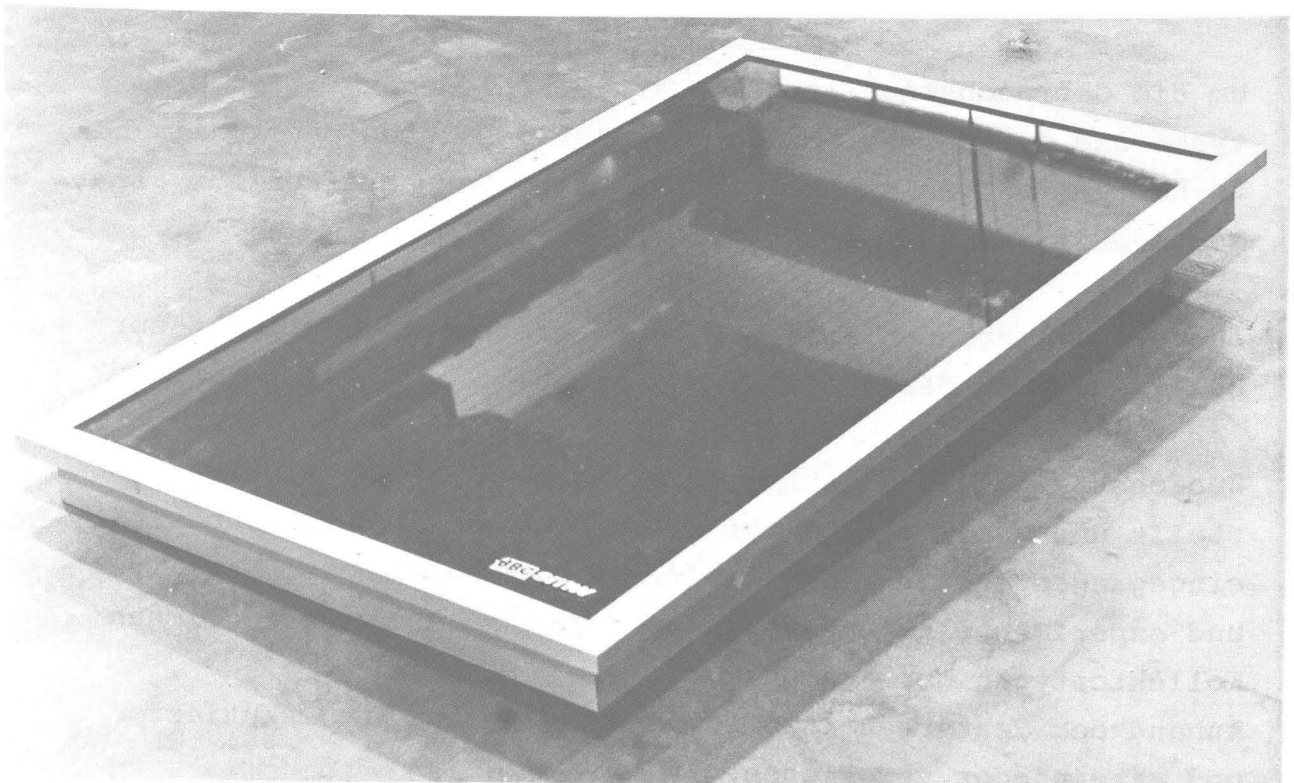


Abb. 1 Foto eines kommerziell erhältlichen Flachkollektors.

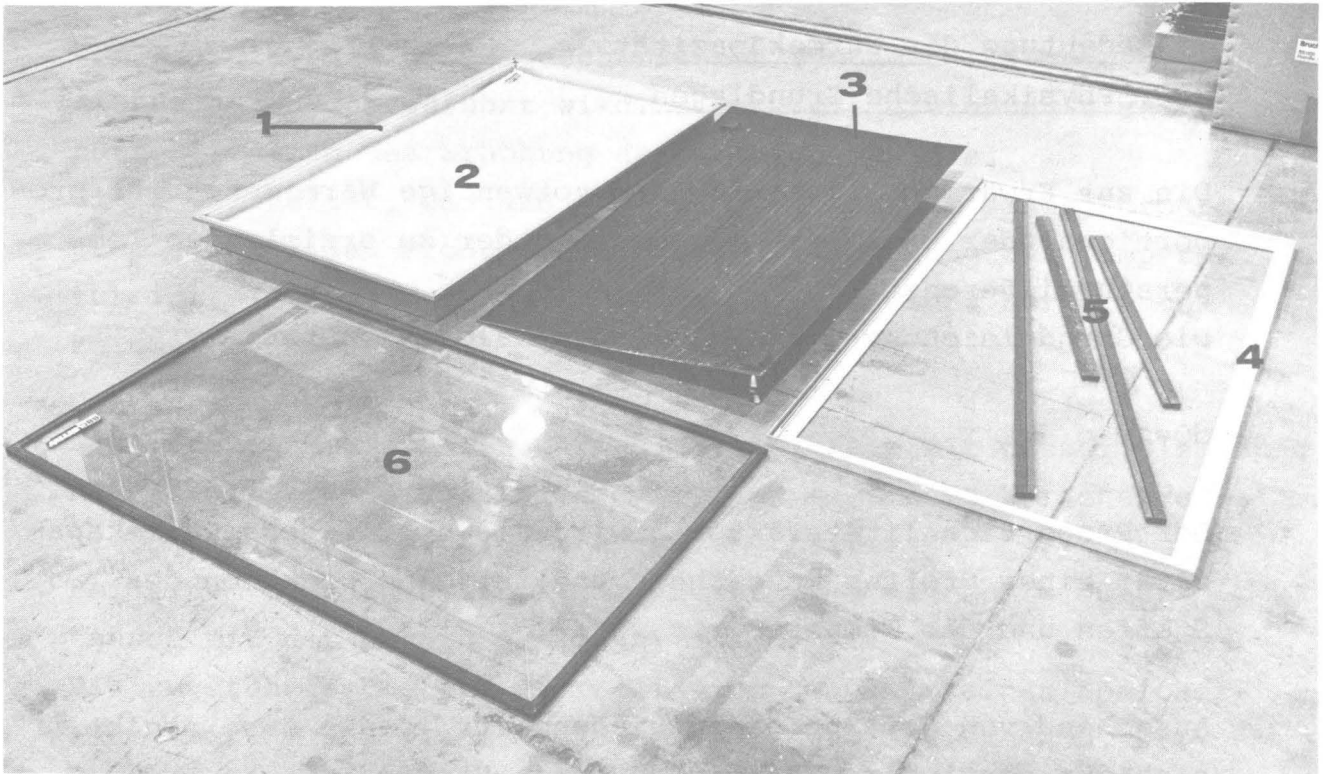


Abb. 2 Einzelteile des in Abb. 1 gezeigten Flachkollektors.

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1) Rahmen | (Aluminium) |
| 2) Rückseitenisolation | (Polyurethanschaumplatte) |
| 3) Absorber | (Aluminium) |
| 4) Abdeckrahmen | (Aluminium) |
| 5) Seitenisolation | (Hartschaumprofilleiste) |
| 6) Frontabdeckung | (Glas) |

3. Bedeutung der Wärmekapazität

3.1. Physikalische Grundlagen

Die zur Erwärmung eines Körpers notwendige Wärmemenge ist proportional der Masse des Körpers und der zu erzielenden Temperaturdifferenz.

Die Grundgleichung der klassischen Kalorik lautet:

$$dQ = m \cdot c \cdot dT \quad (1)$$

Der Proportionalitätsfaktor c wird als spezifische Wärmekapazität eines Stoffes bezeichnet und ist eine Funktion des Stoffes und der Temperatur $c_{(St,T)}$.

Ausgehend von der Zustandsgleichung für ideale Gase ergibt sich für die innere Energie dU eines Stoffes

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (2)$$

Durch Einsetzen in den ersten Hauptsatz der Wärmelehre

$$dQ = dU + p dV \quad (3)$$

folgt

$$dQ = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right] dV \quad (3.1)$$

Für einen Festkörper bei isochorer Zustandsänderung gilt

$$dQ = \left(\frac{dU}{dT} \right) dT \quad (4)$$

Durch Gleichsetzen mit Gleichung (1) erhält man

$$m \cdot c \cdot dT = \left(\frac{dU}{dT} \right) dT \quad (5)$$

$$dQ = dU = m \cdot c \cdot dT$$

Die Energie, die einem geschlossenen System bei isochorer Zustandsänderung zugeführt wird, dient, wie Gleichung 4 zeigt, ausschließlich der Erhöhung der inneren Energie.

Gl. 6 beinhaltet, daß die Änderung der Energie eines Körpers proportional dem Produkt $m \cdot c$ und der Änderung der Temperatur ist. (mc) wird als die Wärmekapazität eines Körpers bezeichnet.

Ein offenes System, wie der Kollektor, kann mit dieser Gleichung nicht vollständig beschrieben werden, da die vorhergehende Beziehung nur für geschlossene Systeme gilt.

Bei einem offenen System tritt zusätzlich ein Energieaustausch mit der Umgebung auf.

Die zugeführte Energie dQ teilt sich dabei in einen Speicherterm $(mc) dT$ und einen Verlustterm dE_v auf (siehe Abb. 3).

$$dQ = (mc) dT + dE_v$$

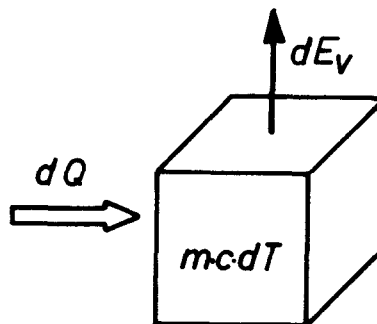


Abb. 3 Energiebilanz eines thermischen Systems.

Die Verluste werden durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion verursacht.

Die vorhergehenden allgemeinen Beziehungen haben auch für den Kollektor Gültigkeit, jedoch treten bisher noch nicht berücksichtigte Effekte auf.

Da die mittlere Absorbertemperatur sich von der Umgebungstemperatur unterscheidet, bilden sich verschiedene Temperaturgradienten in den einzelnen Kollektorkomponenten. Die Energie, die in die Flüssigkeit übertragen wird, erwärmt die Flüssigkeit und verursacht einen Temperaturgradienten in Strömungsrichtung.

Ein Teil der von dem Absorber absorbierten Strahlungsenergie muß

in der Platte zum Rohrbereich geleitet werden. Daher wird die Temperatur in der Mitte zwischen zwei Röhren höher sein als die Temperatur in der Nähe der Röhren. In den Röhren ist die Temperatur nahezu einheitlich.

Da an jeder Stelle des Kollektors das allgemeine Temperaturniveau durch die lokal vorherrschende Temperatur der Flüssigkeit bestimmt wird, ist eine Situation gemäß Abb. 4 zu erwarten.

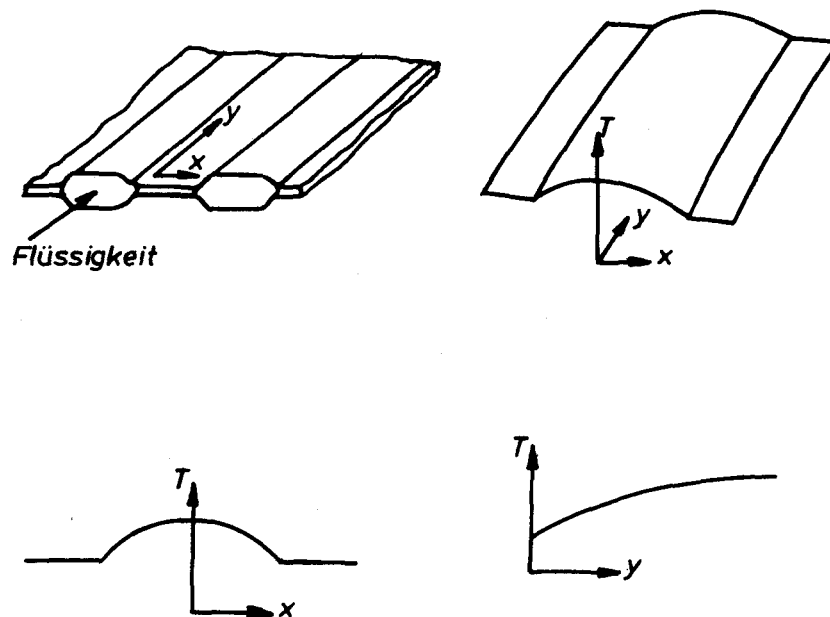


Abb. 4 Temperaturverteilung einer Absorberplatte.

Die Gesamtkapazität eines Kollektors setzt sich zusammen aus der Summe der Einzelkapazitäten (Absorber, Abdeckung, usw.).

Die Komponenten unterscheiden sich bezüglich ihres Materials und im Betrieb durch unterschiedliche Temperaturniveaus. Aus diesem Grund wird eine wirksame Wärmekapazität bestimmt, welche die Temperaturverteilung der einzelnen Kollektorkomponenten berücksichtigt.

3.2 Wärmekapazität als Kollektorkenngröße

Ein guter Sonnenkollektor ist in erster Linie durch einen hohen Wirkungsgrad gekennzeichnet, der als $\frac{Q_n}{G}$ definiert ist. Der Wirkungsgrad kann durch verschiedene Testmethoden bestimmt werden. Die verbreitetste Methode ist die Messung des Wirkungsgrades im stationären Zustand, d.h. der Kollektor befindet sich mit der Umgebung im thermischen Gleichgewicht.

Für diesen Fall ist der Wirkungsgrad definiert durch /1,2/:

$$\eta = (\alpha\tau) - K_{p-u} \frac{T_p - T_u}{G} \quad (6)$$

Hierbei bedeuten:

$(\alpha\tau)$	das Transmission-Absorptions-Produkt
K_{p-u}	der Wärmedurchgangskoeffizient von der Absorberfläche zur Umgebung, $W m^{-2} K^{-1}$
T_p	die mittlere Temperatur der Absorberplatte, K
T_u	die Temperatur der Umgebungsluft, K
G	die solare Bestrahlungsstärke in der Ebene des Kollektors, $W m^{-2}$

Für den stationären Zustand ist diese Gleichung für alle Flachkollektoren anwendbar. In der Realität sind jedoch die Betriebsbedingungen, wie Einstrahlung, Einlauftemperatur, Umgebungstemperatur usw., nicht stationär, sondern ändern sich beliebig. Werden diese instationären Zustände berücksichtigt, so wird der Wirkungsgrad auch von der Wärmekapazität des Kollektors beeinflusst.

Da die Absorbertemperatur schwierig zu messen ist, wird die mittlere Fluidtemperatur als Bezugsgröße gewählt /3,4/.

Die Gleichung für den Wirkungsgrad kann daher wie folgt erweitert werden:

$$\eta = F(\alpha\tau) - F' \cdot K_{p-u} \frac{T_m - T_u}{G} - \frac{(mc)_{eff}}{A \cdot G} \frac{dT_m}{dt} \quad (6.1)$$

$(mc)_{\text{eff}}$	die effektive Wärmekapazität des Kollektors, J K^{-1}
T_m	mittlere Temperatur des Fluids, K
F'	Kollektorwirkungsgradfaktor
A	Transparente Fläche des Kollektors, m^2

Um bei zeitlich veränderlichen, d.h. transienten Vorgängen einen möglichst großen Wirkungsgrad zu erzielen, ist es erstrebenswert die Wärmekapazität des Kollektors klein zu halten.

Da die Wärmekapazität für jeden Kollektortyp aufgrund seiner Konstruktionsmerkmale und der verwendeten Materialien unterschiedlich ist, stellt sie eine kollektorspezifische Kenngröße dar.

Mit der Kenntnis der Kapazität ist es außerdem unter Benutzung der Gleichung (6.1) möglich, den Wirkungsgrad eines Kollektors auch bei instationären Bedingungen zu bestimmen.

3.3 Auswirkungen der Wärmekapazität auf den Systemwirkungsgrad

Zur Ermittlung des Wirkungsgrades sowie der Wärmekapazität wird der Kollektor für sich alleine betrachtet.

In der technischen Anwendung ist der Kollektor in einem System mit Speicher, Pumpe, Wärmeaustauscher usw. integriert. Zur Auslegung eines solchen Systems ist es u.a. erforderlich, das zeitliche Verhalten der einzelnen Komponenten zu kennen. Die Wärmekapazität verursacht eine zeitliche Verschiebung der Temperaturen und beeinflusst den Systemwirkungsgrad.

Aufgrund von wechselnden Witterungsverhältnissen unterliegen Solaranlagen instationären Betriebsbedingungen. Einflüsse der Wärmekapazität eines Kollektors auf die nutzbare Energie wurden von Koch mit Hilfe eines numerischen Modells untersucht /5/. Diese Einflüsse können in zwei verschiedene Anteile zerlegt werden; ein Anteil wird verursacht durch die Aufwärmung des Kollektors am frühen Morgen auf seine Betriebstemperatur am Nachmittag. Der zweite Anteil ist Folge des wechselnden Wetters

während des Tages, wenn die Einflußgrößen wie Sonnenstrahlung und Wind sich schnell ändern.

Der Einfluß der Wärmekapazität auf die Verringerung des Nettoenergiegewinns eines Kollektors durch seine Erwärmung am Morgen auf seine Betriebstemperatur am Nachmittag, kann folgendermaßen beschrieben werden.

Übersteigt der Endwert der mittleren Kollektortemperatur am Nachmittag den Anfangswert der mittleren Temperatur, so tritt ein Energieverlust aufgrund der Wärmekapazität auf. Dieser Verlust kann leicht abgeschätzt werden, indem die wirksame Wärmekapazität des Kollektors mit dieser Temperaturdifferenz multipliziert wird /3/.

Der Verlust, verursacht durch die witterungsbedingten Schwankungen während des Tages, kann berechnet werden, indem man die Gleichung für die instationäre Energiebilanz anwendet. Basisdaten für die Berechnung, Sonnenstrahlung, Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur, liegen gewöhnlich nur als Stundensummen vor. Das heißt, daß die Berechnung des instationären Verhaltens mit solchen Daten nur eine Näherung sein wird.

Mit einigen Vereinfachungen ist es möglich, die Kollektortemperatur als eine Funktion der Zeit abzuschätzen. Durch Multiplikation der effektiven Wärmekapazität mit dem Temperaturanstieg, der notwendig ist, den Kollektor auf seine anfängliche Betriebstemperatur zu bringen, erhält man die Verringerung des Nettoenergiegewinns.

Klein et al. haben gezeigt, daß die Einflüsse von unterbrochenem Sonnenschein, Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur für übliche Kollektoren bei Anwendungen im Niedertemperaturbereich eine vernachlässigbare Auswirkung auf den jährlichen Systemwirkungsgrad haben /3/.

4. Testmethoden zur Bestimmung der effektiven Wärmekapazität

Die Ermittlung der Wärmekapazität ist nach verschiedenen Verfahren möglich.

Sind die Materialien der einzelnen Komponenten und ihre genaue Anordnung bekannt, so kann das transiente Verhalten eines Kollektors entweder mit einem Rechner simuliert und daraus seine Wärmekapazität bestimmt werden, oder durch eine grobe Abschätzung die Kapazität durch Aufsummierung der Einzelkapazitäten nach bestimmten Vorschriften näherungsweise angegeben werden.

Auf die Modellsimulation am Rechner soll im weiteren nicht eingegangen werden, da die Berechnung kompliziert ist und dennoch nur eine Näherung darstellt.

Eine weitere Möglichkeit das Wärmespeichervermögen zu ermitteln ist die experimentelle Untersuchung des Kollektors unter transienten Bedingungen.

All diesen Verfahren liegt die erweiterte H-W-B-Gleichung für zeitlich verändertes Verhalten zugrunde /3/:

$$\eta = F' \cdot (\alpha \tau) - F' \cdot K_{p-u} \cdot \frac{T_m - T_u}{G} - \frac{(mc) \frac{dT_m}{dt}}{A \cdot G} \quad (7)$$

Aus dieser Gleichung läßt sich die scheinbare Wärmekapazität sowie die dadurch verursachte Zeitkonstante ableiten. Bei der Ermittlung des Wärmespeichervermögens ist die absolute Wärmekapazität des Kollektors unbedeutend, da die Temperaturen der Komponenten während einer Transienten unterschiedlich reagieren. Aus diesem Grund muß die scheinbare oder effektive Wärmekapazität bestimmt werden, die diese Verhältnisse berücksichtigt.

Es sollen zunächst rechnerische und anschließend die bekanntesten experimentellen Verfahren zur Bestimmung des Wärmespeichervermögens von Kollektoren beschrieben werden.

5. Methoden zur rechnerischen Bestimmung der Wärmekapazität

5.1 Testverfahren des Bundesverbandes Solarenergie (BSE)

5.1.1 Allgemeines zur BSE-Methode

Das Verfahren wurde vom Bundesverband Solarenergie (BSE) entworfen um einheitliche Bewertungskriterien für die Gebrauchstauglichkeit von Kollektoren zu erstellen /6/.

Hierbei wird die effektive Wärmekapazität eines Kollektors durch Aufsummieren der einzelnen Wärmekapazitäten der Kollektorkomponenten näherungsweise bestimmt.

5.1.2 Theoretische Grundlagen

Der Wärmeträger, sowie alle thermisch angekoppelten Bauteile bestimmen die Wärmekapazität des Kollektors.

$$(mc) = m \cdot c = V \cdot \rho \cdot c \quad (8)$$

Die Stoffwerte ρ und c beziehen sich auch im folgenden auf 20°C.

Die Gesamtkapazität setzt sich zusammen aus der Summe der Einzelkapazitäten des Fluids und der anderen Kollektorkomponenten.

$$(mc)_{\text{eff}} = (mc)_f + (mc)_p + (mc)_z \quad (8.1)$$

$(mc)_f$ Wärmekapazität des Fluids

$(mc)_p$ Wärmekapazität des Absorbers

$(mc)_z$ Wärmekapazität aller Zwischenbauteile

Für die Wärmekapazität $(mc)_f$ des Wärmeträgers gilt:

$$(mc)_f = V_p \cdot \rho_f \cdot c_f \quad (9)$$

V_f Volumen des Fluids im Absorber

ρ_f Dichte des Fluids

c_f Spezifische Wärmekapazität des Fluids

Für die Wärmekapazität $(mc)_p$ des Absorbers wird über alle Bauteile i summiert, die in unmittelbarem thermischen Kontakt mit dem Wärmeträger stehen.

$$(mc)_p = \sum_i m_{p,i} \cdot c_{p,i} \quad (9.1)$$

Die effektive Wärmekapazität $(mc)_z$ aller Zwischenbauteile, die weder zu den Bauteilen i noch zu den unmittelbar mit der Umgebungsluft in Verbindung stehenden Bauteilen (äußere Abdeckung, äußerer Rahmen, Rückwand) gehören, wird nur mit der Hälfte der wahren Kapazität berücksichtigt.

Zu diesen Bauteilen j zählen z.B. Wärmedämmmaterial oder Zwischenscheiben.

$$(mc)_I = \frac{1}{2} \sum_j m_{z,j} \cdot c_{z,j} \quad (9.2)$$

Dieses Verfahren stellt eine Näherung dar, da die mathematischen Beziehungen empirisch ermittelt wurden.

5.1.3 Durchführung des Verfahrens

Zur Bestimmung des Wärmeevolumens wird der Absorber bei Raumtemperatur mit dem Fluid gefüllt und entlüftet. Der zwischen den Anschlußstutzen im Kollektor befindliche Wärmeträger wird anschließend in einem Gefäß gesammelt. Das Volumen V_f kann somit gemessen werden.

Die übrigen Massen des Absorbers, Isolationsmaterial usw. werden entweder abgeschätzt, den Herstellerangaben entnommen, oder der Kollektor wird zerlegt und die Einzelteile abgewogen. Eine effektive Gesamtkapazität kann somit nach Gl. 8.1 ermittelt werden.

5.2 Analytische Methode

5.2.1 Allgemeines Verfahren

Die Grundlage des Verfahrens bildet die erweiterte HWB-Gleichung 8.1. Durch Umstellen der Gleichung und Einsetzen der einzelnen Parameter kann die Wärmekapazität näherungsweise berechnet werden.

5.2.2 Theoretische Grundlagen

Die beschriebene Gleichung des transienten Verhaltens von Solarkollektoren ist gegeben durch:

$$(mc)_{\text{eff}} \frac{dT_m}{dt} = F' \cdot (\alpha\tau) \cdot G \cdot A - \dot{m} \cdot c \cdot (T_a - T_e) - F' \cdot K_{p-u} A (T_m - T_u) \quad (10)$$

Ein Kollektor kann durch folgendes Ersatzschaltbild weitgehend beschrieben werden.

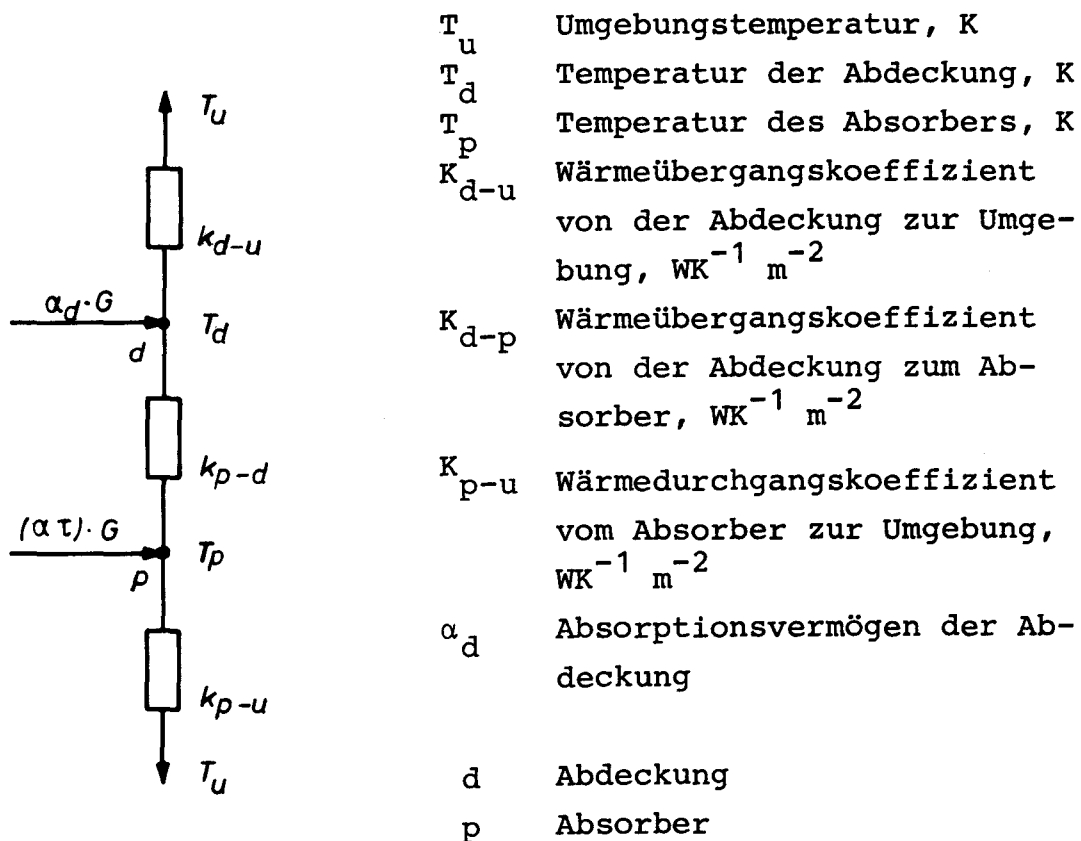


Abb.5 Ersatzschaltbild eines Kollektors

Für den Knotenpunkt P läßt sich folgende Knotengleichung für transientes Verhalten angeben.

$$\frac{(mc)_{pf}}{A} \frac{dT_p}{dt} + \frac{\dot{m} \cdot c (T_a - T_e)}{A} = F'(\alpha\tau)G - K_{d-p} (T_p - T_d) - K_{p-u} (T_p - T_u) \quad (10.1)$$

$(mc)_{pf}$ Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids.

Ebenso gilt für den Knotenpunkt d die Gleichung

$$(mc)_d \frac{dT_d}{dt} = \alpha_d G - K_{d-u} (T_d - T_u) + K_{d-p} (T_p - T_d) \quad (10.2)$$

Für den stationären Zustand gilt

$$\frac{dT_d}{dt} = 0; \quad \frac{dT_p}{dt} = 0$$

$$\alpha_d \cdot G - K_{d-u} (T_d - T_u) + K_{d-p} (T_p - T_d) = 0 \quad (10.2.1)$$

$$(T_d - T_u) = \frac{K_{d-p}}{K_{d-u} + K_{d-p}} (T_p - T_u) + \frac{\alpha_d}{K_{d-u} + K_{d-p}} G \quad (10.2.2)$$

für $G = 0$

$$\frac{(T_d - T_u)_2}{(T_p - T_u)_2} = \frac{(T_d - T_u)_1}{(T_p - T_u)_1} = \frac{(T_d - T_u)_2}{(T_p - T_u)_2} - \frac{(T_d - T_u)_1}{(T_p - T_u)_1} = \frac{K_{d-p}}{K_{d-u} + K_{d-p}} \quad (10.2.3)$$

Die effektive Wärmekapazität kann als Summe der Wärmekapazitäten von Absorber, Fluid und Glasscheibe aufgefaßt werden.

$$(mc)_{eff} \frac{d(T_p - T_u)}{dt} = (mc)_{pf} \frac{d(T_p - T_u)}{dt} + (mc)_d \frac{d(T_d - T_u)}{dt} \quad (11)$$

durch Integration

$$(mc)_{eff} \left[(T_p - T_u)_2 - (T_p - T_u)_1 \right] = \int_1^2 (mc)_{pf} \frac{d(T_p - T_u)}{dt} dt + \int_1^2 (mc)_d \frac{d(T_d - T_u)}{dt} dt \quad (11.1)$$

$$(mc)_{eff} \left[(T_p - T_u)_2 - (T_p - T_u)_1 \right] = (mc)_{pf} (T_p - T_u)_2 - (T_p - T_u)_1 + (mc)_d \left[(T_d - T_u)_2 - (T_d - T_u)_1 \right] \quad (11.2)$$

$$(mc) = (mc)_{pf} + (mc) \frac{(T_d - T_u)_2 - (T_d - T_u)_1}{(T_p - T_u)_2 - (T_p - T_u)_1} \quad (11.3)$$

Einsetzen der Gl. 10.2.3 in 11.3

$$(mc)_{eff} = (mc)_{pf} + (mc) \frac{K_{d-p}}{K_{d-u} + K_{d-p}} \quad (12)$$

Mit dieser Beziehung ist es möglich, die effektive Wärmekapazität des Kollektors zu bestimmen.

Hierzu ist es nötig, die Wärmekapazitäten der Abdeckung, des Absorbers und des Wärmeträgers zu kennen.

5.2.3 Durchführung des Verfahrens

Die Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids kann, wie in Kap. 5.1 beschrieben, ermittelt werden.

Das Volumen der Abdeckung ist zu messen und mit den relevanten Stoffwerten die Wärmekapazität zu berechnen.

Die Wärmeübergangskoeffizienten K_{d-u} und K_{d-p} werden wie folgt aus den Gleichungen des Wärmeübergangs durch Strahlung und Konvektion näherungsweise berechnet /3,7,8,9/.

In der Thermodynamik ist der Strahlungsaustausch zwischen zwei beliebigen Flächen definiert mit

$$\dot{Q} = \frac{\sigma (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{(1-\epsilon_1)}{\epsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot A_{12}} + \frac{(1-\epsilon_2)}{\epsilon_2 \cdot A_2}} \quad (13)$$

σ Stefan Boltzmann Konstante, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

ϵ Emissionsvermögen

A Fläche der Strahler, m^2

A_{12} Gesichtsfeldfaktor

Allgemein gilt für den durch Strahlung übertragenen Wärmestrom

$$\dot{Q} = A_1 \cdot K_{str} (T_2 - T_1) \quad (13.1)$$

K_{str} Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung, $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$

Gleichung 13 und 13.1 ergibt:

$$K_{\text{str}} = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{A_{12}} + \frac{(1-\varepsilon_2) \cdot A_1}{\varepsilon_2 \cdot A_1}} \quad (13.2)$$

Der Wärmeverlustkoeffizient von der Abdeckung zur Umgebung $K_{\text{d-u}}$ setzt sich zusammen aus Strahlungs- und Konvektionsverlusten.

$$K_{\text{d-u}} = K_{\text{d-u}_{\text{str}}} + K_{\text{d-u}_k}$$

Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung von der Abdeckung zur Umgebung (Himmel) ist der Kollektor als kleiner Körper, der von einem großen umschlossen wird, zu betrachten.

Unter diesen Voraussetzungen nähert sich das Flächenverhältnis $A_{\text{d}}/A_{\text{h}}$ dem Grenzwert Null und der Gesichtsfeldfaktor wird 1. Gl. 13.2 lautet dann

$$K_{\text{d-u}_{\text{str}}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{d}}^2 + T_{\text{h}}^2) \cdot (T_{\text{d}} + T_{\text{h}}) \quad (13.2.1)$$

Der Wärmekoeffizient von ebenen Platten, die im Freien dem Wind ausgesetzt sind, ist gegeben durch den Ausdruck:

$$K_{\text{d-u}} = a + b \cdot V \quad (14)$$

a 5,7 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

b 3,8 $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$

V Windgeschwindigkeit, m/s

Der Wärmekoeffizient $K_{\text{d-p}}$ von dem Absorber zur Abdeckung läßt sich analog $K_{\text{d-u}}$ bestimmen.

$$K_{\text{d-p}} = K_{\text{d-p}_{\text{str}}} + K_{\text{d-p}_k} \quad (15)$$

Für den Strahlenaustausch zwischen Absorber und Abdeckung sind diese als zwei große parallele Platten zu betrachten. Für diesen Fall sind die Flächen A_1 und A_2 gleich groß und der Gesichtsfeldfaktor A_{12} ist 1.

Gl. 13.2 läßt sich dann schreiben:

$$K_{d-p_{str}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_d^2) \cdot (T_p + T_d)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_d} - 1} \quad (13.2.2)$$

Der Wärmeübergang durch Konvektion läßt sich mit den Gesetzen der Ähnlichkeitslehre ermitteln. Hierbei ist die Nusseltzahl eine spezifische Kenngröße /7/.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \frac{K \cdot L}{\lambda}$$

α Wärmeübergangskoeffizient

λ Wärmeleitfähigkeit

L Plattenabstand

Die Nusseltzahl ist eine Funktion von (Re, Pr, Gr) .

$Nu = f(Re; Pr)$ für erzwungene Konvektion

$Nu = f(Gr)$ für freie Konvektion

Nach Tabor kann für den Fall einer 45° geneigten Ebene und $10^4 < Gr < 10^7$ die Nusseltzahl für freie Konvektion folgendermaßen berechnet werden /3/.

$$Nu = 0,093 (Gr)^{0,31}$$

Für die Grashofzahl gilt folgende Beziehung

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2}$$

g Gravitationskonstante

β Volumetrischer Ausdehnungskoeffizient der Luft bei mittlerer Temperatur ($1/T$ für ideale Gase)

ν kinematische Viskosität bei mittlerer Temperatur

ΔT Temperaturdifferenz der beiden Platten

Durch Gleichsetzen und Umstellen der Gleichungen folgt für den Wärmedurchgangskoeffizient:

$$K = \frac{0,093 \cdot \lambda}{L} \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \right)^{0,31} \quad (15.1)$$

Die oben angeführte Gleichung lautet entsprechend in dimensionsbehafter Form für Temperaturen bei 10°

$$K_{10} = 1,14 \cdot \frac{\Delta T^{0,31}}{l^{0,07}} \quad (15.1.1)$$

Hierbei wird K in W/m²K; ΔT in K und l (Plattenabstand) in cm gemessen.

Um die Änderung der Stoffeigenschaften auf andere Temperaturen als 10° C zu korregieren, kann folgende Beziehung verwendet werden.

$$\frac{K_T}{K_{10}} = 1 - 0,0018(\bar{T} - 10)$$

\bar{T} mittlere Temperatur zwischen den beiden Platten, °C.

Daraus ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion zwischen Absorberplatte und Glas:

$$K_{d-p_k} = \left[1 - 0,0018(\bar{T} - 10) \right] 1,14 \frac{\Delta T^{0,31}}{l^{0,07}} \quad (15.2)$$

Durch Einsetzen der Stoffwerte, Temperaturen und Windgeschwindigkeit lassen sich die Wärmeübergangskoeffizienten berechnen.

Dieses Verfahren stellt eine Näherung dar, da die Wärmeübergangskoeffizienten nur näherungsweise bestimmt werden können.

6. Methoden zur experimentellen Bestimmung der effektiven Wärmekapazität

Nachfolgend werden die gebräuchlichsten experimentellen Verfahren zur Bestimmung des Wärmespeichungsvermögens und der dadurch verursachten Zeitkonstante vorgestellt.

Für alle Methoden ist der Kollektor unter transienten Bedingungen zu testen. Zur Durchführung der Versuche ist ein kalorimetrischer Testaufbau erforderlich.

6.1 Integrationsmethode

6.1.1 Allgemeines zum Verfahren

Dieser Vorschlag die Wärmekapazität experimentell zu bestimmen, ist von J. Bougard und A. Pilatte 1978 in Mons (Belgien) ausgearbeitet worden.

In einem Labortest wird eine ähnliche Testapparatur verwendet wie bei der Verlustmessung eines Kollektors /10/.

6.1.2 Theoretische Grundlagen

Die Basis bildet die in Kapitel 5.2.2 beschriebene Gleichung 10

$$(mc)_{\text{eff}} \frac{dT_m}{dt} = F' \cdot G (\alpha\tau) - \dot{m} \cdot c (T_a - T_e) - F' K_{p-u} (T_m - T_u) A \quad (16)$$

Für Messungen im Labor ohne Einstrahlung gilt: $G = 0$

$$(mc)_{\text{eff}} \frac{dT_m}{dt} = \dot{m} \cdot c (T_e - T_a) - F' K_{p-u} (T_m - T_u) A \quad (17)$$

Im quasistationären Zustand ist $(mc) \frac{dT_m}{dt} = 0$

$$\dot{m} \cdot c (T_e - T_a) - F' K_{p-u} (T_m - T_u) A = 0 \quad (17.1)$$

mit $F' \cdot K_{p-u} = K_o$

K_o : Wärmedurchgangskoeffizient vom Fluid zur Umgebung, $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$

$$K_O = \dot{m} \cdot c \frac{(T_e - T_a)}{(T_m - T_u)} \quad (17.2)$$

Durch bestimmte Integration der Gleichung 17

$$(mc)_{\text{eff}} \cdot (T_{m_2} - T_{m_1}) = \dot{m} \cdot c \int_1^2 (T_e - T_a) dt - K_P \cdot A \int_1^2 (T_m - T_a) dt \quad (17.3)$$

$$T_m = \frac{T_e + T_a}{2} = T_e - \frac{T_e - T_a}{2} \quad (18)$$

mit T_u erweitert

$$T_m - T_u = (T_e - T_u) - \frac{T_e - T_a}{2} \quad (18.1)$$

Durch Einsetzen von Gl. 18 und 18.1 in 17.3

$$\begin{aligned} (mc)_{\text{eff}} T_{e2} - T_{e1} &= \frac{(T_e - T_a)_2}{2} + \frac{(T_e - T_a)_1}{2} \\ &= \dot{m} \cdot c \int_1^2 (T_e - T_a) dt - K_O \cdot A \left[\int_1^2 (T_e - T_u) dt - \frac{1}{2} \int_1^2 (T_e - T_a) dt \right] \\ (mc)_{\text{eff}} &= \frac{\dot{m} \cdot c \int_1^2 (T_e - T_a) dt - K_O \cdot A \left[\int_1^2 (T_e - T_u) dt - \frac{1}{2} \int_1^2 (T_e - T_a) dt \right]}{T_{e2} - T_{e1} - \frac{(T_e - T_a)_2}{2} + \frac{(T_e - T_a)_1}{2}} \quad (19) \end{aligned}$$

Mit dieser Gleichung ist es möglich durch Einsetzen der Meßgrößen die effektive Wärmekapazität zu erfassen.

6.1.3 Experimentelle Durchführung

Der Kollektor wird in die in Kap. 7 beschriebene Testapparatur installiert.

Die zu messenden Größen sind:

T_u	Umgebungstemperatur, K
T_e	Kollektoreinlauftemperatur, K
$(T_e - T_a)$	Temperaturdifferenz zwischen Kollektoreinlauf und - auslauf, K
\dot{m}	Massendurchsatz, $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Die Einlauftemperatur T_e des Fluids wird mit einem Thermostaten konstant gehalten und der Kollektor mit der eingestellten Temperatur solange betrieben, bis gewährleistet ist, daß er im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung steht. Danach wird die Einlauftemperatur auf einen um etwa 10 K höheren Wert eingestellt und bei dieser zweiten Temperatur der stationäre Zustand abgewartet.

Während dieser Meßperiode muß darauf geachtet werden, daß der Massendurchsatz konstant bleibt.

Zur Bestimmung von (mc) ist es erforderlich, den Verlauf von $T_e(t)$; $(T_e - T_a)(t)$ und $T_u(t)$ zu registrieren. Abb. 6. zeigt den schematischen Verlauf der Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit.

Die Integrale $\int (T_e - T_a) dt$ und $\int (T_e - T_u) dt$ lassen sich aus der Fläche unter den Kurven graphisch ermitteln oder mit elektronischen Integratoren direkt messen. Die gemessenen Werte in Gl. 19 eingesetzt, ergeben eine effektive Wärmekapazität, deren Genauigkeit von der Meßgenauigkeit der verwendeten Apparatur abhängt.

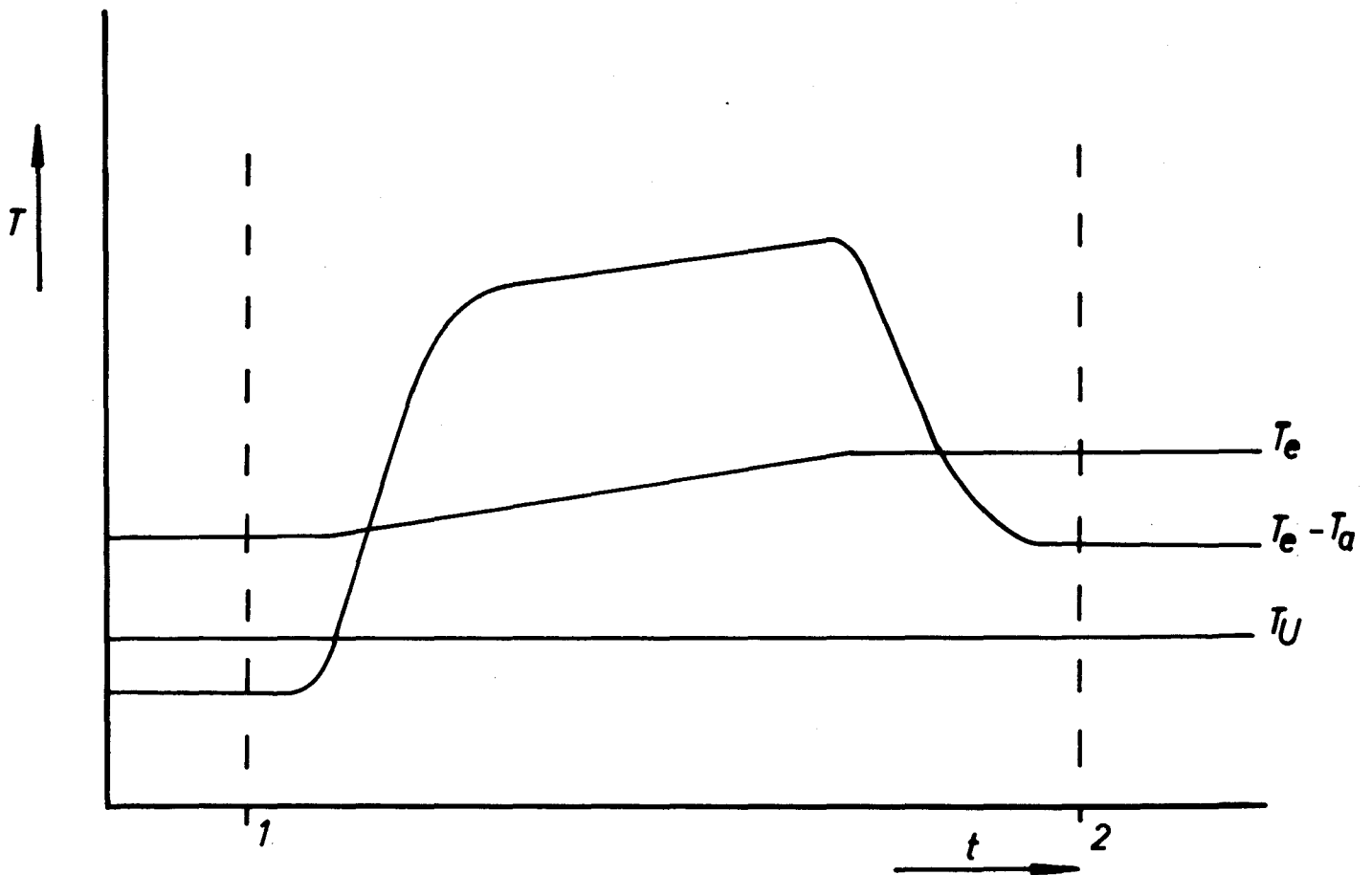


Abb. 6 Schematischer Verlauf von $T_e(t)$; $(T_e - T_a)(t)$ u. $T_u(t)$

1 : 1. stationärer Zustand

2 : 2. stationärer Zustand

6.2 Verfahren der American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)

6.2.1 Allgemeines zum Verfahren

Dieser Vorschlag ist ein Teil der von ASHRAE im Jahre 1977 modifizierten Kollektortestmethode der NBS /11/.

Bei dem Verfahren wird die Zeitkonstante τ bestimmt. Mit diesem Wert ist es möglich die effektive Wärmekapazität eines Kollektors zu berechnen und Systeme zu dimensionieren.

Die Messungen werden unter freiem Himmel durchgeführt, wobei die vorgeschriebenen Testbedingungen eingehalten werden müssen.

6.2.2 Theoretische Grundlagen

Der zugrunde gelegte Ansatz ist die abgewandelte HWB-Gleichung /1/.

$$\frac{(mc)}{A} \frac{dT_m}{dt} = F'G(\alpha\tau) - F' \cdot K_{p-u} (T_m - T_u) - \frac{m \cdot c}{A} (T_a - T_e) \quad (19)$$

Der zeitliche Verlauf der mittleren Fluidtemperatur T_m kann durch die Austrittstemperatur T_a folgendermaßen beschrieben werden:

$$\frac{dT_m}{dt} = B \frac{dT_a}{dt} \quad (19.1)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor B bestimmt werden kann durch /11/:

$$B = \frac{\dot{m} \cdot c}{F' \cdot K_{p-u} \cdot A} \frac{F'}{F_R} - 1 \quad (19.2)$$

Hierin wird F_R der Wärmeabfuhrfaktor des Kollektors genannt, der definiert ist als:

$$F_R = \frac{\text{Nutzbar gesammelte Energie des Kollektors}}{\text{Nutzbar gesammelte Energie wenn die Temperatur des Absorbers gleich der Eintrittstemperatur des Kollektors ist.}}$$

Mit Verwendung der neu eingeführten Größen F_R und B , läßt sich die Differentialgleichung 19 wie folgt schreiben:

$$\frac{(mc)B}{A} \frac{dT_a}{dt} = F_R \cdot G(\alpha\tau) - F_R K_{p-u} (T_e - T_a) - \frac{\dot{m} \cdot c}{A} (T_a - T_e) \quad (20)$$

Allgemein gilt, daß der Wärmetransport in einem Körper, ein Ausgleichsvorgang ist der zeitlich betrachtet einer e-Funktion folgt. Die Geschwindigkeit des Ausgleichsvorgangs ist abhängig von der Zeitkonstanten des betrachteten Systems.

Bei der ASHRAE-Methode wird experimentell ein Temperatur-Ausgleichsvorgang am Kollektor erzeugt. Der Kollektor wird der Sonne ausgesetzt und von einem Fluid durchströmt. Bei quasi stationären Bedingungen stellt sich eine konstante Auläßtemperatur T_a ein. Durch Abdecken der Frontscheibe zum Zeitpunkt $t=0$ wird ein Abklingen von T_a auf T_e erreicht (siehe Abb. 7).

Für zwei verschiedene Zustände läßt sich folgende Gleichung der Auslaßtemperatur als Funktion der Zeit angeben

$$\frac{F_R \cdot G(\alpha\tau) - F_R \cdot K_{p-u} (T_e - T_u) - \frac{\dot{m} \cdot c}{A} (T_a - T_e)_1}{F_R \cdot G(\alpha\tau) - F_R \cdot K_{p-u} (T_e - T_u) - \frac{\dot{m} \cdot c}{A} (T_a - T_e)_2} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20.1)$$

Die Zeitkonstante τ setzt sich zusammen aus:

$$\tau = \frac{K_{p-u} \cdot (mc)}{\dot{m} \cdot c} \quad (20.2)$$

Bei diesen Vorgängen gilt für $t = \tau$ die Beziehung

$$(T_a - T_e)_{t=\tau} = \frac{(T_a - T_e)_{t=0}}{e}$$

Somit kann die Zeitkonstante τ des Kollektors nach Abklingen von T_a auf $T_e + \frac{T_a - T_e}{e}$ als die dazu erforderliche Zeit angegeben werden.

Die effektive Wärmekapazität des Kollektors kann mit Kenntnis der Parameter K_{p-u} , F' und F_R wie folgt berechnet werden

$$(mc) = \frac{\tau \cdot \dot{m} \cdot c}{K_{p-u}} \quad (20.3)$$

In der Regel wird jedoch die Zeitkonstante τ als Bezugsgröße eingesetzt und nicht auf die nähere Bestimmung von (mc) eingegangen.

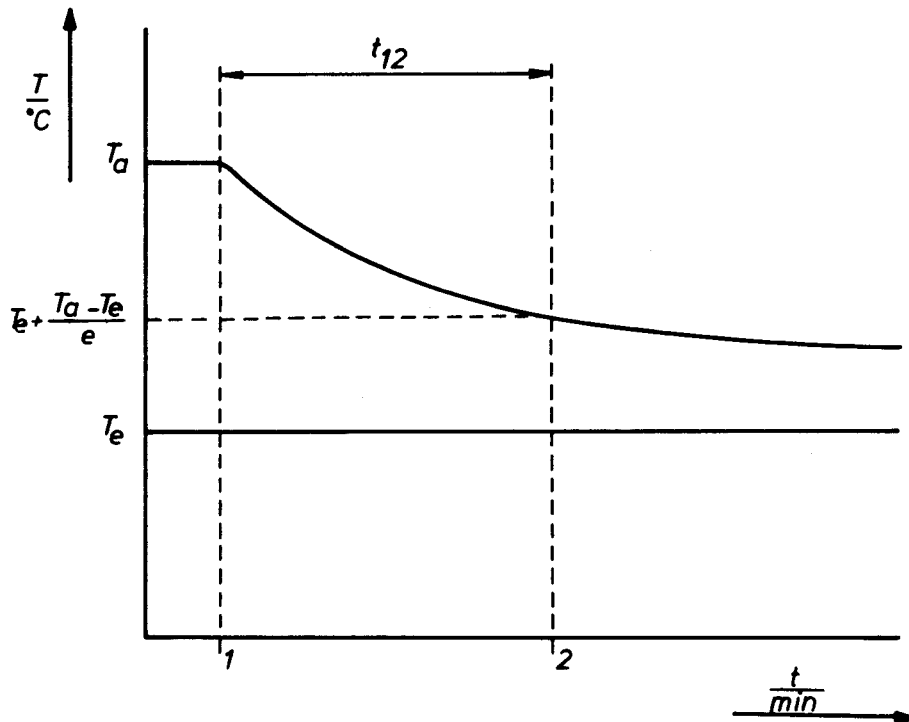


Abb. 7: Schematischer Verlauf der Auslaßtemperatur $T_a(t)$

6.2.3 Experimentelle Durchführung

Der Kollektor wird in den in Kap. 7 beschriebenen Versuchsaufbau installiert und unter freiem Himmel getestet.

Die Durchflußrichtung ist von unten nach oben einzustellen.

Die zu registrierenden Meßgrößen sind

T_e Kollektoreinlauftemperatur

T_a Kollektorauslauftemperatur

T_u Umgebungstemperatur

Außerdem werden gemessen

G Bestrahlungsstärke

\dot{m} Massendurchsatz

Die Kollektoreinlauftemperatur T_e ist so zu wählen, daß sie nicht mehr als $\pm 1\text{K}$ von der Temperatur der Umgebungsluft T_u abweicht.

Die Einstrahlungsleistung soll mindestens 790 W/m^2 betragen und der Massendurchsatz muß konstant bleiben.

Der Kollektor wird so lange betrieben bis ein quasi stationärer Zustand erreicht ist. Die Einstrahlung muß über diesen Zeitraum konstant bleiben.

Sind die Bedingungen erfüllt, wird der Kollektor mit einer Abdeckung abgeschattet und somit ein Abklingen von T_a erreicht.

Die Temperaturen T_e , T_a und T_u werden mit einem Linienschreiber registriert.

Aus der Funktion $T_a(t)$ läßt sich die Zeitkonstante τ nach Gl. 20.3 ermitteln (siehe Abb. 7).

Der Fehler von τ hängt von der Genauigkeit der Testapparatur und der graphischen Ermittlung von t ab /4/.

7. Beschreibung der Meßapparatur und der Laborbedingungen

Als Meßapparatur für die Von Bougard/Pilatte vorgeschlagene Integrationsmethode ist ein Teststand erforderlich, der für Verlustmessungen der Kollektoren nach BSE Innentest-Bedingungen geeignet ist /4/.

Zur Bestimmung der Zeitkonstanten nach ASHRAE ist der vom NBS vorgeschlagene Testaufbau für Kollektorausentests zu verwenden /1/. Für die, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde ein vorhandener Teststand benutzt, der beiden Anforderungen genügt /4/.

Den prinzipiellen Aufbau eines Teststandes zeigt Abb.8.

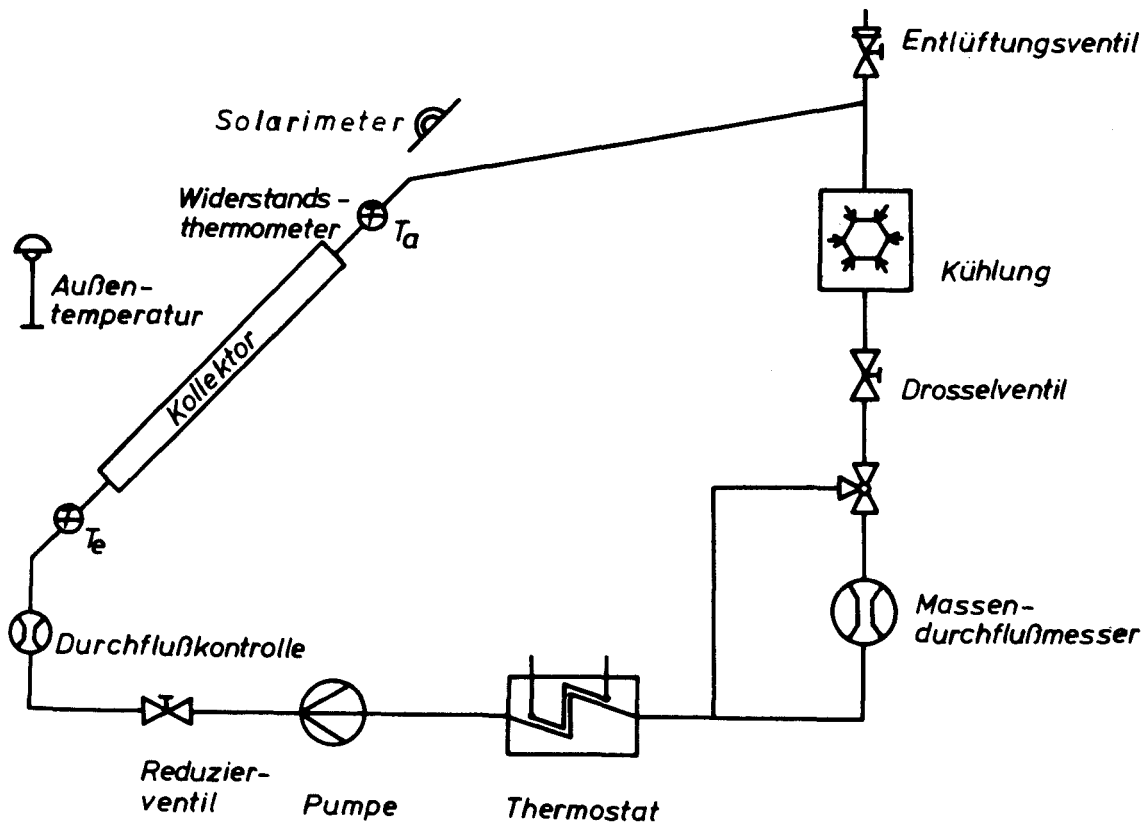


Abb. 8: Prinzipieller Aufbau der verwendeten Testapparatur.

die folgende Aufstellung gibt die Komponenten des Teststandes an, die für die Messungen nach Bougard und ASHRAE geändert werden mußten.

Temperaturmessung

Die Temperaturmessung mit PT 100 Widerstandsthermometern wurde beibehalten.

Zur Bestimmung der Wärmekapazität nach der Integrationsmethode müssen kleine Temperaturdifferenzen gemessen werden. Da auftretende Fehler dieser Meßwerte stark das Endergebnis beeinflussen, müssen die Temperaturdifferenzen auf mindestens 0,1 K genau bestimmt werden.

Die Genauigkeit der Widerstandsthermometer nach DIN 43760 ist für die Meßaufgabe unzureichend. Aus diesem Grunde wurden die Temperaturmessungen mit speziellen Widerstandsthermometern (1/10 DIN-Toleranz) durchgeführt. Die Temperatursensoren befinden sich in Spezialgehäusen, die ohne Schutzhülle direkt in der Rohrleitung eingebaut sind, so daß sie vom Medium gut umströmt werden.

Meßverstärker

Die zu registrierenden Absoluttemperaturen und Temperaturdifferenzen werden mit einem elektronischen Meßverstärker verstärkt und in Spannungen umgeformt. Dieses Gerät liefert für 1 K Temperaturdifferenz 1 V - und pro K Absoluttemperatur 0,1 V Meßspannung. Somit es es möglich, das Auflösungsvermögen zu vergrößern.

Registriereinrichtung

Die Ausgangsspannungen des Verstärkers werden von einem Linienschreiber aufgezeichnet und mit einem Digital-Voltmeter kontrolliert. Transiente Funktionen wie $T_a(t)$ oder $\Delta T(t)$ lassen sich mit diesem Linienschreiber besser als mit einem Punktschreiber aufzeichnen und auswerten. Die Umgebungstemperatur

T_u wird vom Linienschreiber direkt aufgezeichnet. Die meßtechnische Erfassung der Fläche unter der Kurve $\int (T_e - T_a) dt$ kann mit einem elektronischen Integrator erfolgen.

Die Abb. 9 zeigt den Teststand mit der Registriereinrichtung zur Bestimmung der Wärmekapazität nach der Integrationsmethode.

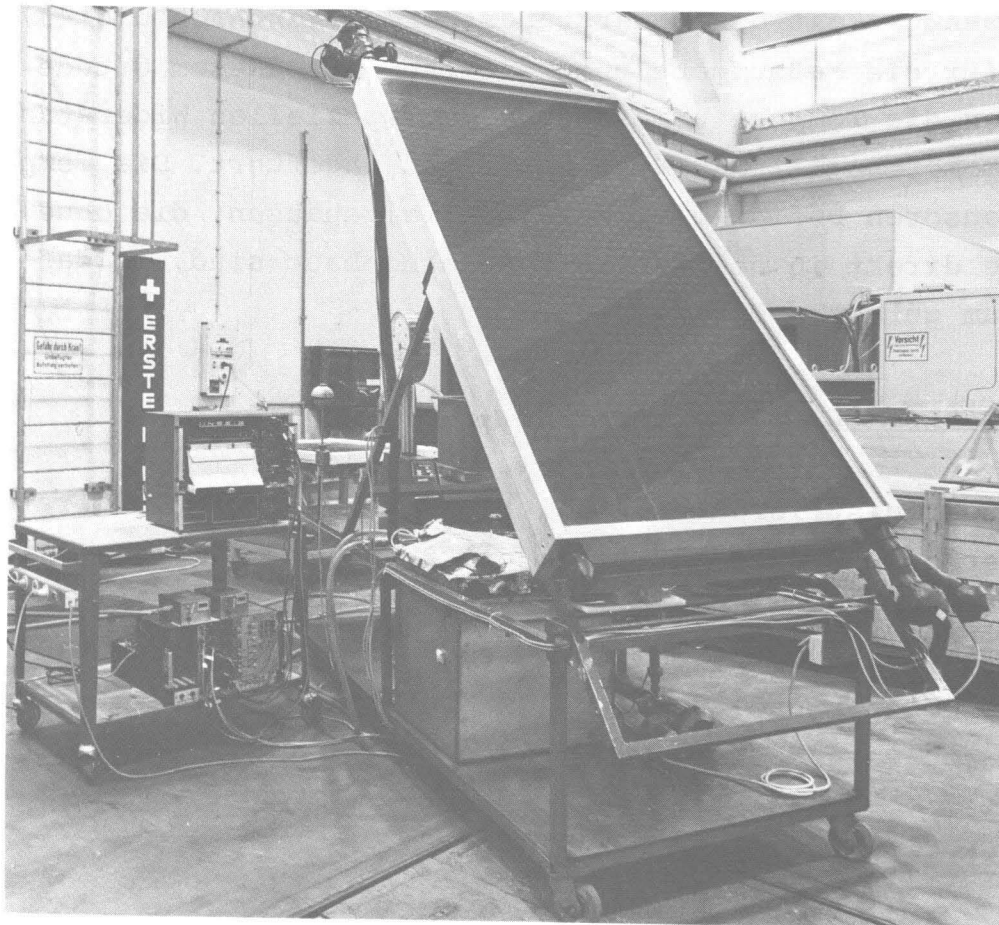


Abb. 9: Meßapparatur mit Registriereinrichtung

Die Spezifikation aller anderen Komponenten der Meßapparatur werden weitgehend eingehalten und sollen hier nicht weiter beschrieben werden /4/.

Die Räumlichkeiten für den Innentest haben folgende Bedingungen zu erfüllen:

Die umfassenden Wände sollen ein thermisches Emissionsvermögen von größer als 80% besitzen. Die Beleuchtungsstärke des Raumes ist so niedrig zu halten, daß in der Eintrittsfläche des Kollektors eine Bestrahlungsstärke von 1 Wm^{-2} nicht überschritten wird.

8. Beschreibung der verwendeten Kollektoren

Die Experimente wurden an zwei verschiedenen Kollektortypen durchgeführt. Der erste Kollektor war ein auf dem Markt erhältlicher Kollektor der Firma BBC, der zweite Kollektor stand im Rahmen eines Round-Robin Kollektortests der Europäischen Gemeinschaft zur Verfügung /14/.

Die beiden Kollektoren unterscheiden sich technisch, durch ihre Größe und Materialbeschaffenheit, physikalisch durch unterschiedliche Absorberstruktur.

Während der Absorber des BBC-Kollektors matt-schwarz lackiert ist, ist der CEC-3 Absorber selektiv beschichtet.

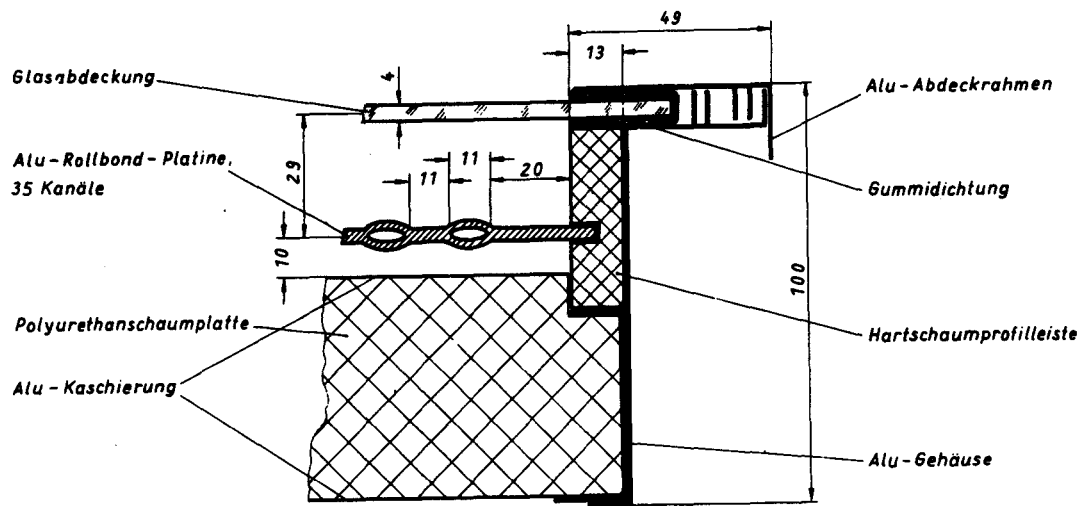
Im folgenden sind die wichtigsten Daten der Kollektoren aufgelistet, die für die nachfolgenden Auswertungen benötigt werden.

Bezeichnung:	<u>BBC-Kollektor</u>	<u>Test-Kollektor CEC-3</u>
Hersteller:	Süddeutsche Metallwerke/Walldorf	SA Giordano/Frankreich
Länge	1,50 m	2,07 m
Breite	0,90 m	1,09 m
Höhe	0,11 m	0,15 m
Transparente Fläche	1,12 m ²	2,01 m ²
Absorption/ Emission	$\alpha=0,94$, $\epsilon=0,93$	
<u>Materialien</u> /	<u>Gewicht</u>	
Abdeckung	Glas/ 12,35 kg	Glas/ 21,20 kg
Absorber	Alu / 4,80 kg	Stahl / 36,80 kg
Isolierung d. Rückseite	Hartschaum / 2,07 kg	Mineralwolle / 4 kg
Gehäuse	Alu / 8,05 kg	Alu
Isolierung d. Seitenteile	Hartschaum / 0,70 kg	Holz / 6,80 kg
Fluid im Absorber	Wasser / 1,24 kg	Wasser / 6,23 kg

Der BBC-Kollektor wurde komplett zerlegt und die Komponenten gewogen.

Um die Materialien der Isolierung und die ungefähren Abmessungen des CEC-3 Kollektors zu ermitteln, wurde dieser teilweise zerlegt. Die Massen der Komponenten wurden hier aus den geschätzten Abmessungen berechnet. Das Fluid im Absorber wurde bei beiden Kollektortypen abgewogen.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Querschnitte der verwendeten Kollektoren.



BBC SMW Typ SOL 2003

äußere Abmessungen 1494 X 894
transparente Fläche 1,11m²

Abb. 10: Querschnitt des BBC-Kollektors /12/.

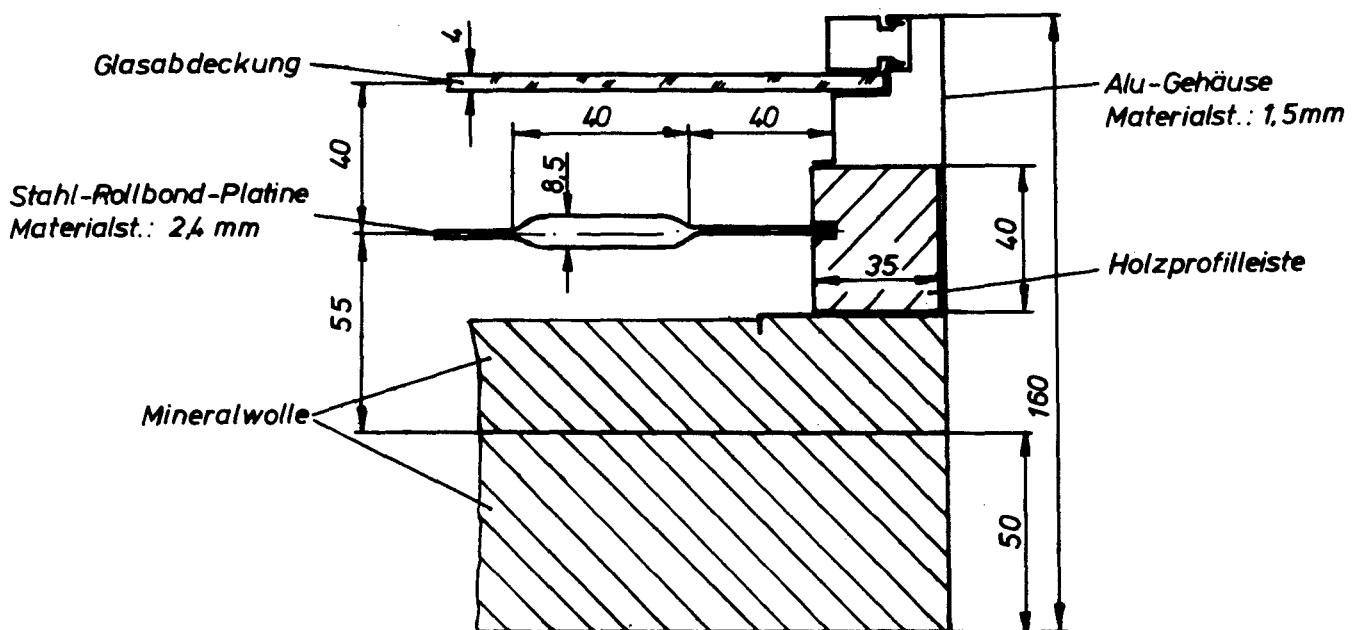


Abb. 11: Querschnitt des CEC-3 Kollektors

9. Auswertung der Meßergebnisse

Die beiden in Kap. 8 beschriebenen Kollektoren werden nach verschiedenen Testverfahren getestet.

Die Messungen wurden in der KFA Jülich von Januar 1979 bis April 1979 durchgeführt.

Als Wärmeträger wurde demineralisiertes Wasser verwendet.

Die zur Berechnung notwendigen Materialwerte wurden, wie in Kap. 8 beschrieben, ermittelt.

9.1 CEC-3 Kollektor

9.1.1 BSE Methode

Die Bestimmung der Einzelkapazitäten nach Kap. 5.1.2 ergibt für die

Wärmekapazität des Fluids im Absorber	$(mc)_f = 26 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität des Absorbers	$(mc)_p = 17,3 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität aller Zwischenbauteile	$(mc)_z = 21,2 \text{ KJ/K}$

daraus ergibt sich eine Gesamtkapazität von

$$\underline{(mc)_{eff} = 53,9 \text{ KJ/K}}$$

9.1.2 Analytische Methode

Die Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids wird, wie unter Kap. 5.1.2 beschrieben, ermittelt.

Wärmekapazität des Fluids und des Absorbers	$(mc)_{pf} = 43,3 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität der Abdeckung	$(mc)_d = 15,7 \text{ KJ/K}$

Die Leitwerte K_{d-u} und K_{p-d} können näherungsweise angegeben werden.

$$K_{d-u} = 10,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{p-d} = 9,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Die Gesamtwärmekapazität ergibt dann

$$\underline{(mc)_{eff} = 50,5 \text{ KJ/K}}$$

9.1.3 Integrationsmethode

In der Tabelle 12 sind die Meßwerte von 14 Messungen angegeben. Um den Einfluß der Temperaturspreizung auf die Wärmekapazität zu untersuchen, wurde die Einlauftemperatur T_{e1} des ersten stationären Zustandes im zweiten stationären Zustand um ca. 10 K bzw. 20 K erhöht.

Die Meßzeit bei einer Spreizung von 10 K betrug ca. 1 Std; bei 20 K ca. 2 Std.

Diagramm 13 zeigt den Wärmedurchgangskoeffizienten K_o als Funktion der Temperaturdifferenz $T_m - T_u$.

Messung	Datum	$(mc)_{\text{eff}}/\text{KJ/K}$
1	16.1.79	49,66
2	16.1.79	49,93
3	26.1.79	49,35
4	31.1.79	49,13
5	31.1.79	48,05
6	31.1.79	48,51
7	15.2.79	50,05
8	15.2.79	48,80
9	15.2.79	48,79
10	19.2.79	50,39
11	19.2.79	50,58
12	19.2.79	51,18
13	23.2.79	51,32
14	15.3.79	51,20

Abb. 12: Tabelle der effektiven Wärmekapazität des CEC-3 Kollektors.

Bei der Messung 1-9 betrug die Temperatur-
spreizung 10 K; bei der Messung 10-14 betrug
die Temperaturspreizung 20 K.

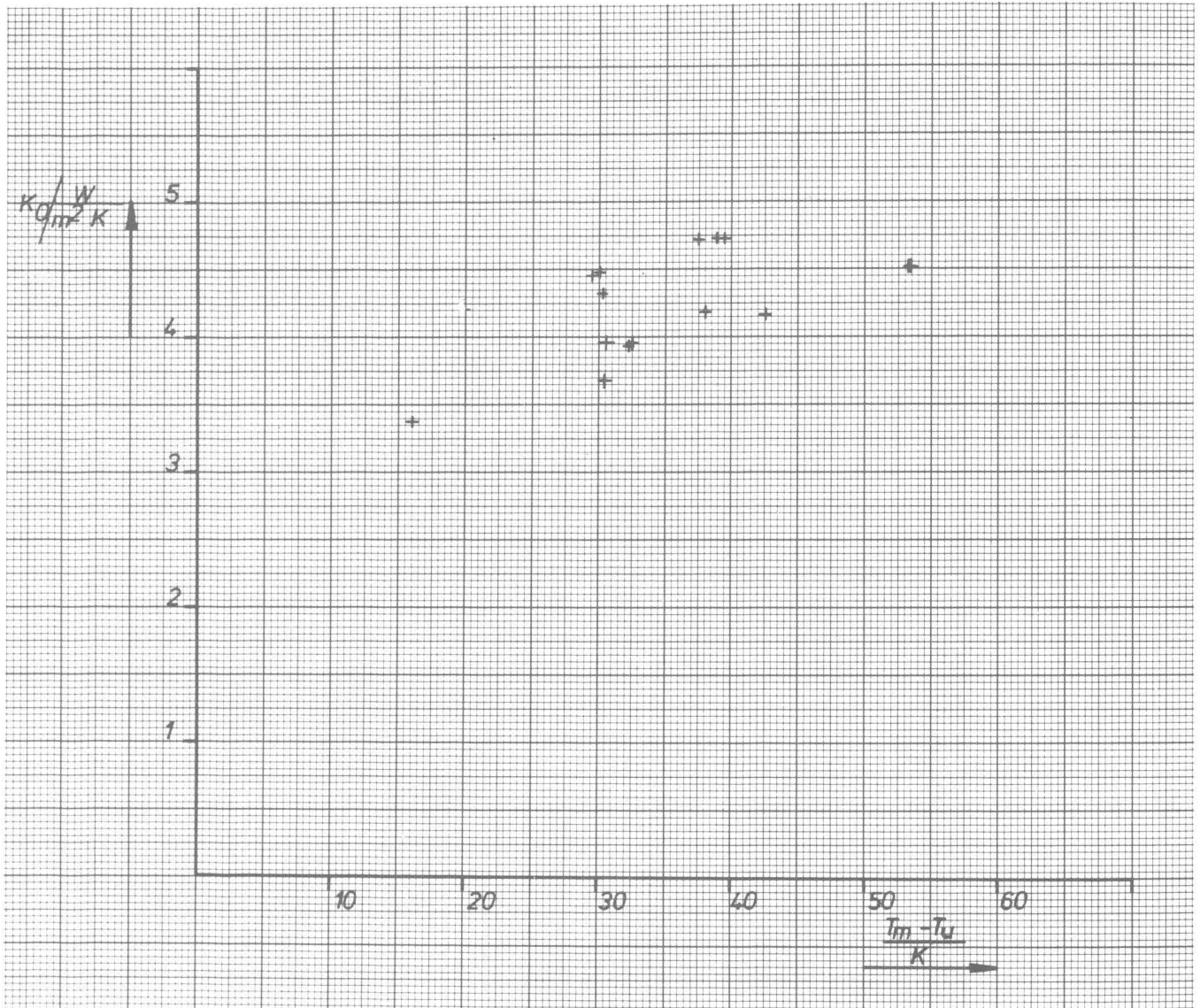


Abb. 13: Wärmedurchgangskoeffizient des CEC-3 Kollektors als Funktion der Temperaturdifferenz $T_m - T_u$ (ermittelt aus der Integrationsmethode).

9.1.4 ASHRAE-Verfahren

Die Messungen nach diesem Verfahren konnten, aufgrund der schlechten Wetterlage, nicht so umfangreich und sorgfältig durchgeführt werden.

4 durchgeführte Messungen ergaben folgende Werte für die Zeitkonstante τ :

1 · 10 min.; 2 · 12 min.; 3 · 13,8 min.; 4 · 14,3 min.

9.2 BBC-Kollektor

Durch seine verhältnismäßig geringe Masse läßt dieser Kollektor eine wesentlich kleinere effektive Wärmekapazität erwarten als der CEC-3 Kollektor.

Durch die schlechten Wetterverhältnisse waren keine Messungen nach der ASHRAE-Methode möglich.

9.2.1 BSE-Methode

Die Bestimmung der Einzelkapazitäten nach Kap. 5.1.2 ergibt für die

Wärmekapazität des Fluids im Absorber	$(mc)_f = 5,2 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität des Absorbers	$(mc)_p = 4,32 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität aller Zwischenbauteile	$(mc)_z = 3,4 \text{ KJ/K}$

daraus ergibt sich eine Gesamtkapazität von

$$\underline{(mc)_{eff} = 11,2 \text{ KJ/K}}$$

9.2.2 Analytische Methode

Die Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids wird, wie unter Kap. 5.1.2 beschrieben, ermittelt.

Wärmekapazität des Fluids und des Absorbers	$(mc)_{pf} = 9,52 \text{ KJ/K}$
Wärmekapazität der Abdeckung	$(mc)_d = 9,14 \text{ KJ/K}$

Die Leitwerte K_{d-u} und K_{p-d} können näherungsweise angegeben werden.

$$K_{d-u} = 10,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{p-d} = 9,29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Die Gesamtkapazität ergibt dann

$$\underline{(mc)_{eff} = 13,7 \text{ KJ/K}}$$

9.2.3 Integrationsmethode

In der Tabelle 14 sind die Meßwerte von 3 Messungen angegeben. Die Experimente an diesem Kollektor brauchten nicht so umfangreich durchgeführt zu werden, da die vorherigen Meßwerte am CEC-3 Kollektor eine weitgehende Reproduzierbarkeit bewiesen.

Die Meßzeit bei einer Spreizung von 10 K betrug ca. 35 min., bei 20 K ca. 55 min.

Messung	Datum	$(mc)_{\text{eff}}/\text{KJ/K}$
1	19.4.1979	10,9
2	19.4.1979	11,86
3	21.4.1979	11,92

Abb. 14: Tabelle der effektiven Wärmekapazität des BBC-Kollektors.

Bei der Messung 1 und 2 betrug die Temperaturspreizung 10 K.

Bei der Messung 3 betrug die Temperaturspreizung 20 K.

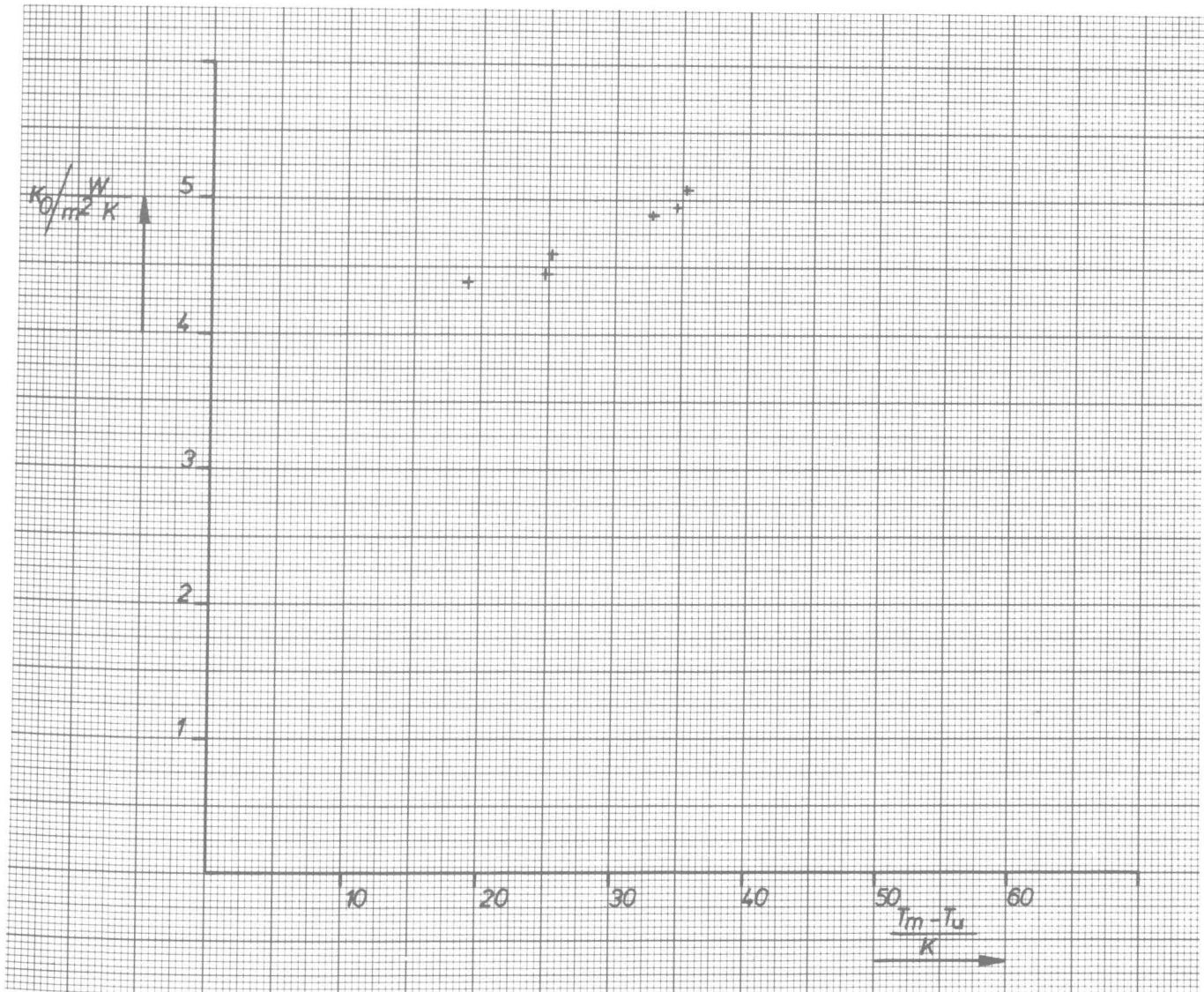


Abb. 15: Wärmedurchgangskoeffizient des BBC-Kollektors als Funktion der Temperaturdifferenz (ermittelt aus der Integrationsmethode).

10. Abschätzung der Meßfehler

Bei der Auswertung der Meßergebnisse sind folgende Meßfehler zu berücksichtigen:

Pyranometer

Fehler vernachlässigbar, da nur zur Kontrolle

Temperaturmeßgeräte

Instrumentengenauigkeit

Absoluttemperatur

$\pm 0,5 \text{ K}$

Temperaturdifferenz

$\pm 0,1 \text{ K}$

Durchflußmessung

Meßgenauigkeit

$\pm 1 \%$

Integratoren und Schreiber

Instrumentengenauigkeit

Schreiber

$\pm 0,5 \%$

Integrator

$\pm 1 \%$

Verstärker

$\pm 0,5 \%$

Übersicht der Meßdaten mit Fehlerangaben

	<u>CEC-3 Kollektor</u>	<u>BBC-Kollektor</u>
	$\frac{(mc)_{eff}}{KJ \cdot K^{-1}}$	$\frac{(mc)_{eff}}{KJ \cdot K^{-1}}$
<u>Integrations-</u> <u>methode</u>	min 48,05 (50,9) ⁺⁾	10,9
	max 51,32 (51,4) ⁺⁾	11,9
	mittel 49,80 (51,2) ⁺⁾	11,6
	relat.	
	Fehler 7%	9%
<u>BSE-Methode</u>	53,9	11,2
<u>Analytische</u> <u>Methode</u>	50,5	13,7
<u>Zeitkonstante</u> min		
<u>ASHRAE</u>	min 10	
	max 14,3	
	mittel 12,2	
	relat.	
	Fehler 30%	

⁺⁾ Bougard, J.; Vergleichswerte /16/

11. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wärmekapazitätsbestimmung an einem Kollektor zeigen Unterschiede zwischen den einzelnen Testverfahren, die in der Übersicht der Meßdaten aufgeführt sind (siehe Seite 43).

Die experimentellen und rechnerischen Methoden angewendet auf einen Kollektor liefern Unterschiede in den Ergebnissen bis zu 20%.

Die experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität nach der Integrationsmethode ergab im Bereich der erforderlichen Genauigkeit gut reproduzierbare Ergebnisse.

Ein Vergleich der Meßdaten mit anderen Instituten zeigt gute Übereinstimmung. (Abweichung ca. 3%). Diese experimentelle Methode hat den weiteren Vorteil, daß sie mit der Wärmeverlustmessung des Kollektors verbunden werden kann.

Über das ASHRAE-Verfahren kann im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage gemacht werden, da wegen schlechten Witterungsbedingungen nicht genug Meßdaten ermittelt werden konnten.

Die Differenz zwischen den Ergebnissen der analytischen- und der Integrationsmethode beträgt bis zu 20%.

Das analytische Verfahren ist mit umfangreichen Rechnungen verbunden und erfordert außerdem das Zerlegen des Kollektors um die Beschaffenheit der Materialien und ihre Anordnung zu bestimmen. Dadurch wird dieses Verfahren zeitintensiv, obwohl das Ergebnis nur eine Näherung ist.

Die Abweichungen der BSE-Daten zu den Ergebnissen der Integrationsmethode betragen für beide Kollektoren max. 8%.

Die BSE-Daten liegen somit in dem durch den experimentellen Meßaufbau verursachten Fehlerbereich der Integrationsmethode. Der Vergleich der BSE-Methode mit den anderen Verfahren zeigt, daß das BSE-Verfahren für die beiden getesteten Kollektortypen im Rahmen der notwendigen Genauigkeit mit geringem Aufwand

gute Ergebnisse liefert. In wieweit diese Methode auf andere Kollektortypen anwendbar ist muß an weiteren Testkollektoren untersucht werden.

12. Auswertungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden zur Verdeutlichung der in Kap. 9. aufgeführten Ergebnisse, einige Auswertungen dargestellt /9,13,15/.

zu 9.1 CEC-3 Kollektor

zu 9.1.1 BSE-Methode

Absorber:

Stahl

Länge ca. 194 cm; Breite ca. 100 cm

Materialstärke ca. 0,24 cm

$p_{St} = 7,9 \text{ g/cm}^3$; $c_{St} = 0,47 \text{ KJ/KgK}$

$m_p = V_A \cdot p_{St} = 4656 \text{ cm}^3 \cdot 7,9 \text{ g/cm}^3$

$m_p = 36,8 \text{ Kg}$

$(mc)_p = M_A \cdot c_A = 36,8 \text{ Kg} \cdot 0,47 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_p = 17,3 \text{ KJ/K}$

Fluid:

Wasser (im Absorber)

$m_f = 6,23 \text{ Kg}$; $c_W^{20^\circ\text{C}} = 4,183 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_f = m_f \cdot c_W = 6,23 \text{ Kg} \cdot 4,183 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_f = 26 \text{ KJ/K}$

Seitenisolation:

Holz

$m_H = \text{ca. } 6,8 \text{ Kg}$; $c_H = 2,4 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_{zH} = m_H \cdot c_H = 6,8 \text{ Kg} \cdot 2,4 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_{zH} = 16,3 \text{ KJ/K}$

Rückenisolation:

Mineralwolle

$V_M = \text{ca. } 10 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} \cdot 200 \text{ cm} = 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^3$

$p_M = 0,02 \text{ g/cm}^3$; $c_M = 1,25 \text{ KJ/KgK}$

$m_M = V \cdot p = 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^3 \cdot 0,02 \text{ g/cm}^3$

$m_M = 4 \text{ Kg}$

$(mc)_M = m_M \cdot c_M = 4 \text{ Kg} \cdot 1,25 \text{ KJ/KgK}$

$(mc)_{zM} = 5 \text{ KJ/K}$

$(mc)_{eff} = (mc)_p + (mc)_f + 1/2 (mc)_{zH} + (mc)_{zM}$

$(mc)_{eff} = 53,9 \text{ KJ/K}$

zu 9.1.2 Analytische Methode

Die Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids ergibt sich aus der BSE-Methode (Anhang 9.1.1).

$$(mc)_p = 17,3 \text{ KJ/K}; (mc)_f = 26 \text{ KJ/K}$$

$$(mc)_{pf} = (mc)_p + (mc)_f = 43,3 \text{ KJ/K}$$

Abdeckung:

Glas

Länge ca. 203 cm; Breite ca. 104 cm

Dicke ca. 0,4 cm

$$\rho_{Gl} = 2,5 \text{ g/cm}^3; c_{Gl} = 0,74 \text{ KJ/KgK}$$

$$m_d = V_D \cdot \rho_{Gl} = 8445 \text{ cm}^3 \cdot 2,5 \text{ g/cm}^3$$

$$m_d = 21,2 \text{ Kg}$$

$$(mc)_d = m_D \cdot c_{Gl} = 21,2 \text{ Kg} \cdot 0,74 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_d = 15,7 \text{ KJ/K}$$

Für die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten werden folgende Annahmen getroffen:

Abstand Absorberplatte-Deckscheibe	3,5 cm
Emissionsvermögen der Deckscheibe	0,88
Emissionsvermögen der Absorberplatte	0,95
Temperatur der Umgebung	10°C
Windgeschwindigkeit	0 m/s
Temperatur der Absorberplatte	65°C
Neigung des Kollektors	45°

Die Temperatur der Deckscheibe wurde mit 35°C angenommen.

$$K_{d-u_{Str}} = (T_d^2 + T_h^2) \cdot (T_d + T_h)$$

$$K_{d-u_{Str}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \cdot 0,88 (308^2 + 283^2) \cdot (308 + 283) \text{ K}^3$$

$$K_{d-u_{Str}} = 5,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-u_K} = 5,7 \text{ W/m}^2\text{K} + 3,8 \text{ J/m}^3\text{K} \cdot V$$

$$K_{d-u_K} = 5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-u} = K_{d-u_{\text{Str}}} + K_{d-u_K} = 5,16 \text{ W/m}^2\text{K} + 5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-u} = 10,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p_{\text{Str}}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_d^2) \cdot (T_p + T_d)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_d} - 1}$$

$$K_{d-p_{\text{Str}}} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K} (338^2 + 308^2) \cdot (338 + 308) \text{ K}^3}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,88} - 1}$$

$$K_{d-p_{\text{Str}}} = 6,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p_K} = \left[1 - 0,0018 (\bar{T} - 10) \right] 1,14 \frac{T^{0,31}}{10,07}$$

$$K_{d-p_K} = \left[1 - 0,0018 (50 - 10) \right] 1,14 \frac{30^{0,31}}{3,5^{0,07}}$$

$$K_{d-p_K} = 2,78 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p} = K_{d-p_{\text{Str}}} + K_{d-p_K} = 6,44 \text{ W/m}^2\text{K} + 2,78 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p} = 9,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = (mc)_{pf} + (mc)_d \frac{K_{d-p}}{K_{d-u} + K_{d-p}}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = 43,3 \text{ KJ/K} + 15,7 \text{ KJ/K} \frac{9,22}{10,86 + 9,22}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = 50,5 \text{ KJ/K}$$

zu 9.1.3 Integrationsmethode

$$K_O \cdot A = \dot{m} \cdot c \frac{T_e - T_a}{(T_e - T_u) - \frac{T_e - T_a}{2}}$$

$$K_O \cdot A = \frac{(K_{O1} + K_{O2}) A}{2}$$

$$\dot{m} \cdot c = \frac{(\dot{m} \cdot c)_1 + (\dot{m} \cdot c)_2}{2}$$

stationärer Zustand 1

T_{u1}	19,9 K
T_{e1}	50,2 K
$(\dot{m} \cdot c)_1$	157,52 W/K
$(T_e - T_u)_1$	30,3 K
$(T_e - T_a)_1$	1,66 K
$K_{O1} \cdot A$	8,87 W/K

transiente Phase

$\int (T_e - T_a) dt$	9018 K·s
$\int (T_e - T_u) dt$	110036 K·s

stationärer Zustand 2

T_{u2}	19,7 K
T_{e2}	59,8 K
$(\dot{m} \cdot c)_2$	157,64 W/K
$(T_e - T_u)_2$	40,1 K
$(T_e - T_a)_2$	2,33 K
$K_{O2} \cdot A$	9,43 W/K

$\dot{m} \cdot c$	157,58 W/K
$K_O \cdot A$	9,15 W/K

$$(mc)_{eff} = \frac{455182 \text{ J}}{9,265 \text{ K}}$$

$$(mc)_{eff} = 49129 \text{ J/K}$$

zu 9.2 BBC-Kollektorzu 9.2.1 BSE-Methode

Absorber:

Aluminium

$$m_p = 4,8 \text{ Kg}; c_A = 0,9 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_p = m_A c_A = 4,8 \text{ Kg} \cdot 0,9 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_p = 4,32 \text{ KJ/K}$$

Fluid:

Wasser (im Absorber)

$$m_f = 1,24 \text{ Kg}; c_W^{20^\circ\text{C}} = 4,183 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_f = m_f \cdot c_W = 1,24 \text{ Kg} \cdot 4,183 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_f = 5,2 \text{ KJ/K}$$

Isolation:

Hartschaum

$$m_z = 2,7 \text{ Kg}; c_I = 1,25 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_z = m_I \cdot c_I = 2,7 \text{ Kg} \cdot 1,25 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_z = 3,4 \text{ KJ/K}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = (mc)_p + (mc)_f + \frac{1}{2} (mc)_z$$

$$(mc)_{\text{eff}} = 11,2 \text{ KJ/K}$$

zu 9.2.2 Analytische Methode

Die Wärmekapazität des Absorbers und des Fluids sind aus der BSE-Methode übernommen (Anhang 9.2.1).

$$(mc)_p = 4,32 \text{ KJ/K}; (mc)_f = 5,2 \text{ KJ/K}$$

$$(mc)_{pf} = (mc)_p + (mc)_f = 9,52 \text{ KJ/K}$$

Abdeckung: Glas

$$m_d = 12,35 \text{ Kg}; c_{Gl} = 0,74 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_d = m_d c_{Gl} = 12,35 \text{ Kg} \cdot 0,74 \text{ KJ/KgK}$$

$$(mc)_d = 9,1 \text{ KJ/K}$$

Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten werden folgende Annahmen getroffen.

Abstand Absorberplatte-Deckscheibe: 2,4 cm
 alle anderen Angaben wie unter Anhang 9.1.2.

$$K_{d-u} = 10,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p_{\text{Str}}} = 6,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(Beide Berechnungen siehe Anhang 9.1.2)

$$K_{d-p_K} = \left[1 - 0,0018 (50-10) \right] 1,14 \frac{30^{0,31}}{2,4^{0,07}}$$

$$K_{d-p_K} = 2,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_{d-p} = K_{d-p_{\text{Str}}} + K_{d-p_K} = 6,44 \text{ W/m}^2\text{K} + 2,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\underline{K_{d-p} = 9,3 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = (mc)_{pf} + (mc)_d \frac{K_{d-p}}{K_{d-u} + K_{d-p}}$$

$$(mc)_{\text{eff}} = 9,52 \text{ KJ/K} + 9,1 \text{ KJ/K} \frac{9,3}{10,86+9,3}$$

$$\underline{(mc)_{\text{eff}} = 13,7 \text{ KJ/K}}$$

13. Nomenklatur

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche, transparente Kollektorfläche	m ²
A ₁₂	Gesichtsfeldfaktor	-
c	Spezifische Wärmekapazität	JKg ⁻¹ K ⁻¹
F'	Kollektorwirkungsgradfaktor	-
F _R	Wärmeabfuhrfaktor des Absorbers	-
G	Totale Bestrahlungsstärke auf Ebenen beliebiger Neigung	-
g	Gravitationskonstante	ms ⁻²
Gr	Grashofzahl	-
K	Wärmedurchgangskoeffizient	Wm ⁻² K ⁻¹
K _{d-p}	Wärmedurchgangskoeffizient von der Abdeckung zum Absorber	Wm ⁻² K ⁻¹
K _{d-u}	Wärmedurchgangskoeffizient von der Abdeckung zur Umgebung	Wm ⁻² K ⁻¹
K _{p-u}	Wärmedurchgangskoeffizient vom Absorber zur Umgebung	Wm ⁻² K ⁻¹
K _K	Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion	Wm ⁻² K ⁻¹
K _{Str}	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung	Wm ⁻² K ⁻¹
L	Plattenabstand	m
m	Masse	Kg
\dot{m}	Massenstrom	Kgs ⁻¹
(mc)	Wärmekapazität	JKg ⁻¹ K ⁻¹
(mc) _{eff}	Effektive Wärmekapazität	JKg ⁻¹ K ⁻¹
p	Druck	Pa
Nu	Nusseltzahl	-
Q	Energie, Wärmemenge	J
\dot{Q}	Leistung, Wärmemenge pro Zeit	W
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
T _a	Austrittstemperatur	K
T _p	mittlere Temperatur der Absorberfläche	K
T _d	Temperatur der Deckscheibe	K
T _e	Eintrittstemperatur	K

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
T_m	mittlere Temperatur des Fluids	K
T_u	Umgebungstemperatur	K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
U	innere Energie	J
V	Volumen	m^3

Griechische Symbole

α	Absorptionsvermögen	-
α_d	Absorptionsvermögen der Abdeckung-	
β	Volumetrischer Ausdehnungs- koeffizient	K^{-1}
ϵ	Emissionsvermögen	-
η	Wirkungsgrad	-
λ	Wärmeleitfähigkeit bei mittlerer Temperatur	$Wm^{-2}K^{-1}$
ν	Kinematische Zähigkeit	m^2s^{-1}
ρ	Spezifisches Gewicht	Kgm^{-3}
σ	Stefan Boltzmann Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$	$Wm^{-2}K^{-4}$
τ	Transmissionsgrad der Abdeckung	$-, s^{-1}$
	Zeitkonstante	

14. Literaturverzeichnis

- /1/ NBS (National Bureau of Standards), Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance (NBSIR 74-635)
- /2/ ASE (Arbeitsgemeinschaft Solarenergie e.V.) Richtlinien und Hinweise für die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit von Solarkollektoren (September 1976)
- /3/ Duffie, J.A.; Beckmann, W.A., Sonnenenergie, Thermische Prozesse, Udo Pfriemer Verlag, München (1976)
- /4/ Schröer, R., Vergleich zweiter Testmethoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades thermischer Flachkollektoren, Ingenieurarbeit, FH-Aachen/Abt. Jülich, Jülich (1977)
- /5/ Koch, K., private Mitteilung
- /6/ BSE-Arbeitsgruppe (Bundesverband Solarenergie), Gebrauchstauglichkeit von Solarkollektoren, Teil A: Wirkungsgradtest von Solarkollektoren, (Mai 1978)
- /7/ Elsner, N., Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Bertelsmann Universitätsverlag, Berlin (1973)
- /8/ Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 13. Auflage, Band 1
- /9/ VDI-Wärmeatlas, 2. Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1974)
- /10/ Bougard, J., Pilatte, A., Integral method for the determination of the apparent heat capacity of a solar collector, Laboratoire de Thermodynamique-Faculté Polytechnique, Mons (1978)
- /11/ Hill, J.; Jenkins, J., Jones, D., Testing of solar collectors according to ASHRAE-Standard 93-77, Thermal engineering section, National bureau of standards, Washington (1978)
- /12/ Pohl, P., Messungen des Wirkungsgrades von thermischen Flachkollektoren, Ingenieurarbeit, FH-Aachen/Abt. Jülich, Jülich (1978)
- /13/ Kuchling, H., Physik-Formeln und Gesetze, Buch- und Zeit-Verlagsgesellschaft mbH Köln, Leipzig (1974)

- /14/ Aranovitch, E., The joint solar collector testing programme of the European Community,
UK-ISES Conference, ISSN No. 0306-7874 (April 1977)
- /15/ Hütte, Ingenieur-Taschenbuch, theoretische Grundlagen,
Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, 28. Aufl., Band 1,
Berlin (1955)
- /16/ Bougard, J., private Mitteilung